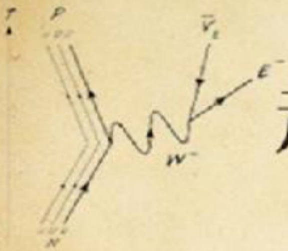


走进费曼丛书

（全册 6 本）

Feynman

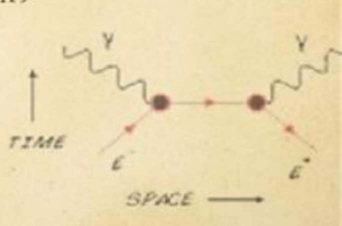




硅谷天才们的偶像

与爱因斯坦齐名的诺贝尔物理学奖得主

理查德·费曼（Richard Feyman）



湖南科学技术出版社

目录

别逗了，费曼先生
费曼讲物理：入门
费曼讲物理：相对论
费曼讲演录：一个平民科学家的思想
QED：光和物质的奇妙理论
物理定律的本性

SURELY YOU'RE JOKING, MR. FEYNMAN!

别逗了，费曼先生

Richard P. Feynman / Ralph Leighton

【美】R·P·费曼 R·莱顿/著 王祖哲/译

R·P·费曼（1918～1988）出生在纽约市的法洛克维。1942年在普林斯顿大学获得博士学位。在第二次世界大战期间，他对发展原子弹做出过重要贡献。战后费曼曾先后在康奈尔大学和加州理工学院教书。1965年，他因量子电动力学方面的研究荣获诺贝尔物理学奖。除了作为一个物理学家外，费曼在不同时期还曾是故事大王、艺术家、鼓手和密码破译专家。



R. P. Feynman.

走近费曼丛书

湖南科学技术出版社

版权信息

别逗了，费曼先生

作者：(美) R·P·费曼　R·莱顿

译者：王祖哲

ISBN：9787535772428

湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
诺顿平装本手记
前言
导言
第1部分 从法洛克维到麻省理工学院
他动动脑袋瓜子就能修好收音机！
菜豆
谁偷了门？
拉丁语还是意大利语？
总想逃避
米特普拉斯特公司的首席化学家
第2部分 在普林斯顿大学的岁月
“别逗了，费曼先生！”
我——！
猫地图？
魔鬼头脑
搅和油漆
别具一格的工具箱
测心术
业余科学家
第3部分 费曼，炸弹和军队
嘶嘶的信管
考验猎犬
从低处看洛斯阿拉莫斯
撬锁贼碰到了撬锁贼
山姆大叔不要你了
第4部分 从康奈尔大学到加州工学院，接触巴西
讲派头的教授
有问题吗？
我要我的一块钱！
你就这样问她们？
幸运数字
又是这个美国人！
什么话都会说
照您吩咐的，老大！
盛情难承
第5部分 一个物理学家的世界
你解狄拉克方程吗？
百分之七的答案
十三次
“鸡母牛，鸡母牛！”

- 但那是艺术吗？
- 电是火吗？
- 书好书坏，看看封面
- 诺贝尔的另一个错误
- 把文化带给物理学家
- 巴黎见分晓
- 另类状态
- 野狐禅科学

译后记

诺顿平装本手记

《“别逗了，费曼先生！”》付梓至今，已逾十载，可是读者对费曼的兴趣，正方兴未艾。这使我想起了他在风烛残年之时，经常说的一句话，说话之时，双眸生辉：“我还没死！”

拉夫·莱顿（Ralph Leighton）

前言

本书中的这些故事，是我在和理查德·费曼高高兴兴打鼓的七年之间，零散而随意地积累起来的。我发现，每段故事，各有异趣，连缀成集，竟成大观。一个人的一辈子，竟然能发生这么多奇妙而疯狂的事情，有时令人难以置信。一个人在他的一生中，能发明这么多本出无心的恶作剧，亦足可启愚化钝！

拉夫·莱顿（Ralph Leighton）

我一生的几个事实：我于1918年出生在纽约郊区的一个名叫法洛克维的小镇子，靠海边。我在那儿一直生活到1935年，那时我17岁。我到麻省理工学院待了四年，然后，大约是在1939年，我到了普林斯顿大学。在普林斯顿那段时间，我开始参加“曼哈顿计划”，最后在1943年4月到了洛斯阿拉莫斯，一直待到1946年10月或者11月的样子，我到了康奈尔大学。

我在1941年和阿琳结婚。我在洛斯阿拉莫斯期间，在1946年，她死于肺结核。

我在康奈尔大学一直待到大约1951年。我在1949年夏天访问了巴西，1951年又在那儿待了半年，然后到了加利福尼亚工学院，以后就一直待在那儿。

1951年末我在日本待了几个星期，一两年之后，我和我的第二个妻子玛丽·娄又去了趟日本。

我现在和格温妮丝结了婚，她是英国人。我们有两个孩子，卡尔和米歇尔。

费曼

导言

对理查德·费曼的追忆，我希望本书并非绝无仅有。当然，这里的这些回忆文字，为这个人物大致描绘了一幅真实的画面——他对难题的几乎难以抑制的需要，他那些令人恼火的恶作剧，他对装腔作势和假装正经的愤恨和不耐，以及他能胜过那些试图胜过他的人的本事！这是一本很棒的读物：挥霍无忌、惊世骇俗，却仍然温馨，很有人情味儿。

尽管如此，本书仅仅是稍微触及了他的人生根本：科学。我们在这里或那里，能够看到，作为背景材料，科学只是一笔带过，而不是作为他的人生焦点来处理的，但他一代一代的学生和同事，都知道科学在他的生活中的分量。或许本书也只能这样来写。要把关于他和他的工作的那些爽人心神的故事组织起来，或许也真的没有办法：挑战与挫折，得到慧见时的兴奋，科学的理解带来的深深的喜悦，这才是他的人生快乐之源。

我记得，在我做他的学生，去听他讲课的时候，是个什么情景。他站在讲堂之前，微笑着看我们进来，用指头在前排长椅的黑色靠背上敲打着一种复杂的节奏。迟到的人就座之后，他拿起一支粉笔，粉笔在他的手指之间飞快地旋转，好像一个职业赌徒在玩儿一副扑克牌，他仍然微笑着，好像心里藏着个什么笑话。然后——仍然在微笑——他对我们讲物理学，讲他的图表和方程式，帮助我们分享他的真知灼见。他的笑容，他眼中的闪光，并非来自什么秘密的笑话，而是来自物理学。物理学带来的这种快乐！这种快乐是有传染性的。我们受到了这种感染，是很幸运的。现在，你也有机会来感受费曼风格的生活快乐了。

阿尔伯特·希伯斯（Albert R.Hibbs）

于加利福尼亚技术学院

喷气推进实验室

第1部分　从法洛克维到麻省理工学院

他动动脑袋瓜子就能修好收音机！

我十一二岁的时候，在家里搞了个实验室。它由一个旧木头包装箱构成，我在里头加了搁板。我有个加热器，我平时把肥油放里边做法国炸土豆。我还有个蓄电池和一个电灯排。

为了做这个电灯排，我上小杂货店，弄了些插座，用螺丝钉固定在木座上，然后用电铃线把它们串起来。通过用开关以不同的方式把灯泡儿连接起来——串联的和并联的——我知道我能够得到不同的电压。但我没意识到灯泡儿的电阻决定于它的温度，因此我计算的结果和这个电路弄出来的东西不一样。但不妨事儿的，灯泡儿串联起来的时候，都半亮着，它们都发发发发发光，很漂亮——棒！

我在系统里装了保险丝，所以哪儿一短路，保险丝就烧了。现在我必须弄到比我家里的保险丝弱一点的那种，我就自己造保险丝，方法是把锡纸包在一段儿烧坏了的保险丝上。我在保险丝的那头安了个5瓦的灯泡儿；保险丝烧了的时候，总在给蓄电池充电的点滴式充电器出来的电，会把灯泡儿点亮。灯泡儿在配电盘上，在一片褐色的糖果纸后面（后面的灯一亮，糖果纸就发红）——因此，如果哪儿出了娄子，我就会看配电盘，撑不住劲的保险丝那儿就会有一个大红点儿。好玩儿哦！

我喜欢玩儿收音机。我先是从商店里买了个矿石收音机，在夜里，我在床上将睡未睡的时候，用耳机听。父母晚上出去要很晚才回来的时候，他们就来我房间，把耳机拿开——担心我在睡着的时候，别有什么玩意儿在我脑袋里闹腾。

大约是在那个时候，我发明了一个防盗铃，一个简单的傻玩意儿：那不过是一个大电池，用电线连着一个铃儿。我房间的门一开，门就把电线推到电池上接通了电路，那铃就响了。

有天晚上，我妈妈和爸爸夜出回来，蹑手蹑脚地没一点儿声音，怕吵着孩子啊，开了我房间的门，好拿开耳机。突然之间，那个巨大的铃儿震天价地响起来——乓乓乓乓乓！我大叫着从床上跳了下来，“管用啊！管用啊！”

我有个福特线圈——从一辆汽车上卸下来的打火线圈——我把打火端弄在我的配电盘上头。我打算在打火端装个Rathenon　RH电子管，里头是氩气，火花会在真空里产生紫色的亮光——那可真叫棒！

有一天，我正在玩那个福特线圈，用火花在纸上打窟窿，把纸给点

着了。我很快就拿不住那纸了，因为快烧到我手指了，我就把它扔在装满报纸的字纸篓里。你知道，报纸烧得很快，在屋子里，火苗儿显得挺大。我关了门，那样我妈妈就发现不了我房间里起火了——她跟朋友在客厅里打桥牌呢，我从近旁抓了一本杂志，盖在字纸篓上想把火闷熄。

火灭了之后，我拿开杂志，但现在房间里都是烟。字纸篓还是烫得没法儿动，我就用钳子把它拖过房间，把它弄到窗户外散烟。

可是外面刮着小风儿，又把火吹着了，而现在我也够不到那本杂志了。所以我又从窗口把字纸篓拖了回来，好去拿杂志。我注意到窗户上有帘子——非常危险啊！

还好，我拿到了杂志，又把火扑灭了，这次我抓着杂志不放，我把字纸篓里发红的火炭抖落到两三层楼底下的街上。然后，我出了屋子，随手把门带上，对我妈妈说："我去玩儿了。"烟慢慢从窗子里冒着。

我还用电动机干了一些事情，还为我买的一个光电池造了一个放大器；当我把手放在这个电池前面的时候，这个光电池能把一个铃儿弄响。我想做的事很多，但没能都做到，因为我妈妈总不让我在家待着。但我常常在家里，摆弄我的实验室。

我从清仓大甩卖那儿买了几个收音机。我没什么钱，但东西不贵——都是旧收音机，坏了的。我买来，想修好。毛病通常不大——一眼就看到有电线松了，线圈断了，或者有些地方没缠紧——因此，我还真能让几个收音机响起来。有一晚上，我从一台收音机里听到了在得克萨斯州韦科（Waco）[1]市的"韦科广播电台"——这可太刺激了！

在我的实验室里，用的还是这同一台电子管收音机，我听到了斯克内克塔迪（Schenectady）[2]市的一家叫WGA的电台。现在，我们这些小孩子——我的两个堂兄弟、我妹妹，还有邻居家的小孩儿——都在楼下听收音机，听一个叫"伊诺犯罪俱乐部"的节目——伊诺泡腾盐赞助的——就这玩意儿！我发现，在楼上我的实验室里，我能提早一小时听到在纽约播出的这个WGA的节目！因此，我知道什么事儿将会发生，然后，当我们大家都在楼下围着收音机坐成一圈儿听"伊诺犯罪俱乐部"的时候，我会说，"你们大家知道，我们好久没听到什么什么人的声音了。我敢打赌，他会来，来挽回局势。"

两分钟后，嘀嗒，他来了！大家果然欢呼雀跃，我还预言了另外几件事。于是他们才意识到这里头一定有什么门道——不知怎么，我必定知道这个门道。因此，我也就爽快地承认了是怎么回事，我们可以在楼上提前一小时听这个节目。

很自然，你知道这会有什么结果。现在，这一个钟头，他们是等不得了。他们都到楼上，在我的实验室里，守着这台叽叽嘎嘎的收音机守上半个钟头，听斯克内克塔迪市的"伊诺犯罪俱乐部"。

那时我们住在一所大房子里，那是我爷爷留给他的孩子们的，这些孩子也没有很多钱搬到别处去住。那是个很大的木头房子。我在房子外边把电线拉得到处都是，在每个房间里都装了插座，这样我总能听那台在楼上的收音机发出的声音。我还有一个喇叭——不是一个完整的喇叭，没有喇叭口儿。

有一天，我戴着耳机，我把耳机连到喇叭上，我发现了一点儿东西：我把手指头放在喇叭里，而我从耳机里能听到这个；我用指甲刮喇叭，而我能从耳机里听到这刮擦声。因此，我发现，喇叭能有耳机那样的作用，而且你甚至不需要电池。在学校里，我们讲到亚历山大·格雷汉姆·贝尔（Alexander Graham Bell）[3]，我就把这个喇叭和耳机演示了一番。我不知道这就是电话，但我想这就是贝尔当初用的电话。

因此，我现在有了一个麦克风，我可以从楼上向楼下、从楼下向楼上放广播了，用的是我在清仓大甩卖那里买来的放大器。那时，我妹妹琼（她比我小9岁）一定也有两三岁了，电台上有个叫唐叔叔的家伙，她喜欢听他的节目。他唱些“好孩子”之类的小儿歌，还念父母们寄去的卡片，说“住在弗莱特市布什大街25号的玛丽什么什么的这个星期六过生日”。

一天，我堂弟弗兰西斯和我把琼安顿坐下来，说有一个特别节目，她应该听听。然后，我们跑到楼上，开始广播：“我是唐叔叔。我们认识一个名叫琼的可爱的小女孩儿，她住在新百老汇。她快过生日了——不是今天，而是哪天哪天。她是个聪明伶俐的小姑娘。”我们唱了一首儿歌，然后我们播放音乐：“嘀哆哩嘀，嘟哆噜嘟；嘀哆嘀哆哩，嘟哆噜嘟嘟……”我们把这一整套节目弄完了，然后下了楼：“怎么样？你喜欢这节目吗？”

“很好哦，”她说，“可你们为什么用嘴巴弄音乐呀？”

有一天，我接了一个电话：“先生，您是理查德·费曼吧？”

“是。”

“我这儿是家旅馆。我们有台收音机出了毛病，想修修。我们知道您或许能帮点儿忙。”

“可我不过是个小孩儿啊，”我说，“我不知道怎么……”

“是啊，这个我们知道，不管怎么样，您还是来一趟吧。”

那家旅馆是我姑妈开的，但我还不知道呢。我就到了那儿——他们到现在还讲这故事呢——带着一把螺丝刀，插在后裤袋里。哈，我很小，什么螺丝刀在我后裤袋里看起来都挺大。

我跟收音机忙活上了，想把它修好。它什么毛病，我一点儿也不知

道，但旅馆里还有个打杂儿的，或许是他注意到了，或许是我先看见了，可变电阻上的一个旋钮，就是用来调节音量的那玩意儿，松了，所以拉不动轴了。他到一边去锉了个什么东西，然后装好了，事儿就办妥了。

我修理的下一台收音机，完全没声儿。这个容易：插头插得不对。修理的东西越来越复杂了，我的本事也越来越好，越来越精到了。我在纽约买了个毫安表，把它改造成了个伏特计，上面有不同的刻度，方法是用经过我计算过的合适长度的上好铜线。它不很精确，但还是足够好的，能测准那些收音机的不同接点是不是正常。

大家雇我干活儿，主要原因是大萧条。他们拿不出钱修收音机，他们听说这个小孩儿钱少也愿意干。于是我就爬到房顶上修天线，以及诸如此类的事情。问题越来越难，我就得到了一系列的教训。最终我干的活儿是把直流电收音机改为交流电的，要想把嘈杂声从系统里去掉，不是一件容易的事情，我做得也不很好。我不该弄不好，可是不知道怎么弄。

有个活儿干得实在轰动。那时我在为一个搞印刷的人工作。有个人，认识那个搞印刷的，知道我在找修理收音机的活儿，于是他就派了个伙计到印刷所来找我。那家伙明显很穷，那汽车快报废了——我们就到了他家，在城里的穷人区。在路上，我说："收音机什么毛病啊？"

他说："我开了它，它就出噪声，过了一阵子，那噪声就停了，一切正常了，但是我不喜欢开始时的那个动静。"

我心里想："见鬼！要是他没钱，他就该暂且忍一忍那点儿噪声。"

在去他家的路上，他一个劲儿地唠叨，"你明白收音机，是吧？你怎么明白收音机的——你还是个小孩儿嘛！"

他一路上都在拿我开涮，我心里想，"这人什么毛病？一点儿噪声，有什么要紧的。"

但等我们到那儿的时候，我把收音机打开。一点儿噪声？我的天啊！怪不得这可怜的家伙受不了。这东西开始咆哮加上哆嗦——哇啊哇啊啊啊啊啊——声音大得不得了，接着，它安顿下来，运行正常。我就想："这是怎么了啊？"

我开始来回踱步，想辙，我想到，发生这种情况，有可能是电子管发热的次序不对——就是说，放大器全热了，电子管准备好了要工作，可是电子管没有得到什么输入，或者说有某种逆着电路走的输入，或者说在开始的部分（射频部分）有毛病了，因此它才产生了这么大的噪声，是在拾起什么东西。当射频电路最终运行起来的时候，栅极电压得到了调整，一切也就正常了。

那家伙就问我：“你磨蹭什么啊，你是来修收音机的，可你光在这里走来走去的！”

我说：“我在想辙啊！”接着我在心里说：“好吧，把电子管拿出来，把机器里的次序来个大颠倒。”（那年头儿的许多收音机，在不同的地方用的是相同的电子管——我想是212安的那种——兴许也是214安的。）因此我把电子管都改了，再把收音机打开，它安静得像只小绵羊：它等着热起来，然后运行完美——噪声没了。

当一个人对你瞧不上眼的时候，而你接着就做出了像这种真能挽回面子的事儿，那他们通常对你就百分之百地另眼相看了。他又给我弄了一些活儿，逢人就说我是个多么了不得的大天才，说：“他动动脑袋瓜子就能修好收音机！”一个小孩子，停下来想了一阵子，就能琢磨出怎么个弄法——思想，这个东西，能用来修理收音机——他压根儿没想到这事儿是可能的。

在那年头儿，收音机的线路容易理解得多，因为什么玩意儿都摆在外边。你把收音机拆开（找到你该扭的螺丝钉倒是个大问题），你就看出这是个电阻器，那是个电容器，这儿是这么个东西，那儿是那么个东西；什么东西都贴着标签呢。如果蜂蜡从电容器上滴下来，那就是它太热了，你可以知道电容器给烧坏了。如果在某个电阻器上有黑炭，你就知道麻烦出在哪儿。或者，假定你单凭看却看不出个究竟，你可以用伏特计来测它，看看是不是有电压。收音机很简单，线路也不复杂。栅极电压总是一伏半或者两伏，屏极电压是一百或二百伏，直流的。因此，修理个收音机，对我来说，不是难事儿，我明白收音机里头有些什么名堂，看出某个东西不转了，然后修修它。

有时候得费些周折。我记得那一次很特别，费了一个下午，才找到一个不显眼的电阻，烧坏了。这特别的一次，碰巧发生在我妈妈的一个朋友那儿，所以我有时间——没人在我背后说：“你在捣鼓什么啊？”她们却说：“喝点儿牛奶吧，要不吃点儿点心？”我终于把它修好了，因为我有韧劲儿，现在仍然有。一旦我遇到个难题儿，我是不会善罢甘休的。如果我妈妈的朋友说：“别管它，太费劲了。”我反倒来了劲儿，因为我想搞定这该死的东西，我已经费了这么大的劲。在我已经发现了它的许多东西之后，我不可能半途而废。我必须得最终找到它究竟出了什么毛病。

那是一种解决难题的冲动。我想破译玛雅人的象形文字，想打开保险柜，就是这个原因。我记得那是在中学，在上第一节课的时候，有个家伙拿着一个几何难题，或者他的高等数学作业里的什么玩意儿凑过来。我不把这个该死的东西弄出来，我是不会作罢的——这要花费我15到20分钟。但是在一天当中，另外一些家伙拿着同样的问题来找我，那我一眨眼就给他做好了。因此，一个家伙花费了我20分钟，而另外五个家伙认为我是个超级天才。

因此，我得了一个虚名。在上中学的时候，人能知道的每一个难题，都一定会弄到我这儿来。人所发明的每一个该死的、疯狂的难题，我都知道。因此，在麻省理工学院，有一次在舞会上，一个高年级的学生和他的女朋友在那儿，她知道许多难题，他告诉她，我对这些东西拿手。因此，在舞会上她过来对我说，“大家都说你是个聪明的家伙，那好了，这里为你准备了个题目：‘一个人要劈八堆木柴……’”

我说：“隔一堆，劈一堆，把每块儿木头劈作三块儿。”因为我早就听说过这个。

她就走了，可又带来另外一个，这个我也知道。

就这么折腾了好一阵子，最后，舞会也快结束了，她又来了，好像她这次可要真的难住我，她说，“母女两个到欧洲旅行……”

“女儿得了黑死病。”

她瘫在那儿了！要回答这个难题，好不容易才能得到足够的线索：那是个好长的故事，说的是妈妈和女儿停下来住在一家旅馆里，各自住在两个房间里，第二天妈妈到了女儿的房间，连人影儿也没有，或者在那儿的是别人，于是她说，“我女儿哪儿去了？”旅馆老板说，“什么女儿啊？”管顾客登记的那儿，只有妈妈的名字，如此等等，如此等等，发生了什么事情，是个大谜。答案是，女儿得了黑死病，旅馆呢，不想因此关门，把这个女儿的尸体弄走了，把房间收拾干净了，把她住在这里的一切证据都销毁了。那是个很长的故事，但我听过，因此，当那个女孩儿开始说“母女两个到欧洲旅行”的时候，我知道我以前听过的一个故事就是这么开头儿的，于是我做了一个快速的猜测，而我也猜对了。

我们在中学的时候，有代数小组这么一种东西，由五个孩子组成，我们作为一个团队，旅行到不同的学校去进行比赛。我们坐在一排椅子上，另一个队坐在另一排椅子上。一个老师，主持比赛的，拿出个信封，信封上写着“45秒”。她把信封撕开，把问题写在黑板上，说：“开始！”——因此，你实际上拥有的时间超过了45秒，因为她在写的时候，你是可以思考的。这游戏是这样的：你有一张纸，你在这纸上写什么都行，你拿这纸做什么都行。唯一作数的，是答案。如果答案是“六本书”，你写的必须是“6”，并且在这数码上画一个大圈儿。如果圈儿里的东西是对的，你赢了；不对的话，你输了。

有一件事儿是肯定的：用常规的那种直肠子的办法来解决问题，实际上是不可能的，比方说：“A是红色书的数目，B是蓝色书的数目。”你磨啊、磨啊、磨啊，最后算出来了，是“六本书”。那需要50秒，因为为这种题目规定时间的那帮人，已经把题目搞成了窍门题。因此，你一定要想：“是不是有什么办法能看出门道？”有时，你一闪念就看到了，有时你必须发明别的招数来对付，那样才能以你最快的速度来做代数题。那是一种很好玩儿的练习，我做得越来越好，我最后成了这个队的头

儿。因此我学会了很快地做代数，到我上大学的时候，这一招儿很有用处。我们遇到一个微积分问题的时候，看得明白怎么计算，并且迅速地做代数，那就会很快。

我在上中学干的另外一件事儿，是发明问题和定理。我的意思是，如果我做无论什么数学的东西，我都会找到一些实际例子来说明它有什么用处。我发明了一套直角三角形的问题。但是，我不告诉你三角形的两条边的长度，让你求第三条边的长度，我却给出那两条边的差。一个典型的例子是这样：有一个旗杆，一根绳子从杆顶上垂下来。当你把绳子拽紧在旗杆根儿的时候，它比旗杆长出1米；而当你把绳子向外斜拉的时候，它离旗杆根儿有1.5米远。旗杆有多高？

我搞出了一些解决这类问题的方程式，结果我注意到了一些关系——也许它是$\sin^2\alpha+\cos^2\alpha=1$——那使我想起了三角学。在那之前的几年，当时我或许十一二岁，我已经读过一本三角学的书，那是我从图书馆借的，但那本书现在早不知哪儿去了。我能记住的仅仅是，三角学讲的是正弦、余弦之间的关系这类事情。于是，我通过画许多三角来把那些关系搞出来，每一种关系我都自己证明。我还计算了每5度的正弦、余弦和正切，方法是从给定的5度的正弦开始，用我已经琢磨出的加角公式和半角公式。

几年后，当我们在学校里学习三角学的时候，我当年的笔记还保留着，我发现我的证明和书上的那些不同。有时，我没注意到有简单的解决办法，我就用麻烦的办法拐弯抹角地也能证明出来。另外有些时候，我的方法才是最聪明的——书上的标准证明方法却是复杂得多！因此，有的时候我打败了它们，有的时候它们打败了我。

在我做这些三角题的时候，我不喜欢表示正弦、余弦、正切，等等的那些符号。在我看来，“sinf”看起来像是s乘以i乘以n乘以f！因此我发明了另外一个符号，像平方根的符号，是一个带着一只伸出来的胳膊的西格码（Σ），我把f放在胳膊下面。正切是一个希腊字母τ，但τ上面那一横伸长了；为了表示余弦，我制造了一个和Γ类似的符号，但它有点儿像平方根符号。

反正切是同样的西格码，但是口儿朝左，因此它是从横画开始写起的，值写在它的下边，然后就是西格码。那就是反正切，$\sin^{-1}f$反而不像——这玩意儿简直是发疯嘛！大家却把这个写在书里！在我看来，$\sin^{-1}$意思是1/sin，是sin的倒数。因此我的符号比较好些。

我不喜欢f（x）——在我看来，这玩意儿像是f乘以x。我也不喜欢dy/dx——你真的好想把两个d约掉——于是我制造了一个不同的符号，有点像&。至于对数，我的符号是L向右撇得很厉害，把一个东西写在那里头，就表示这个东西的对数，如此等等。

比起惯常的那些符号来，我认为我的符号就是好，即使不更好——

用什么符号，那是无所谓的——但我后来发现，那是有所谓的。有一次，我在学校里向另外一个孩子解释一个什么东西，连想也没想，就用开了我自己的符号，他说，“这都是些什么鬼东西？”我这才意识到，如果我要跟别人谈事情，我一定要用标准符号，因此我最后还是放弃了我自己的符号。

我还为打字机发明了一套符号，就跟Fortran计算机语言似的，那样我就能打方程式了。我也修打字机，用别针和橡皮圈儿来修（那种橡皮圈儿不像洛杉矶这里的橡皮圈儿那么容易断），但我不是个专业的修理工；我只是修修，让它们能用。但是，找到毛病在哪儿，还有琢磨出你该怎么修它，这整个的问题——对我而言，真是有趣，就跟难题一样有趣。

菜豆

那年，我在我姑妈开的旅馆干活儿的时候，一定有十七八岁。我不知道我能赚多少钱——我想是每月22美元吧——我交替着一天工作十一个钟头，第二天工作十三个钟头，站柜台，或者在餐厅端盘子洗碗。下午，你站柜台的时候，还得给那个迪什么夫人送牛奶，一个病病恙恙的女人，从来不给小费。世上的事儿就这样：你没白没黑地干，却什么也得不到，天天如此。

这个旅馆在旅游胜地，紧挨着海滩，就在纽约郊外。男人们到城里去干活儿，把一帮老婆留在那儿打牌，因此你得把桥牌桌摆好。然后，到了晚上，男人们打扑克，你得把桌子给他们预备好了——倒烟灰缸什么的。我总是熬到深夜，两点钟的样子，因此，实际上我确确实实是一天干十三或者十一个钟头。

有些事情，我不喜欢，比方说小费。我觉得应该多开点儿钱给我们，那就不必要小费了。可是，当我给老板娘提了这么个建议的时候，除了嘲笑之外，我一无所得。她逢人便说：“理查德不想要他的小费，嘻嘻，嘻嘻，嘻嘻；他不想要小费，哈哈，哈哈，哈哈。”这种二百五，满世界都是，连我的话也听不明白。

无论怎么说吧，有段时间，一帮男人，从城里干活儿回来，一来就要冰块儿，好放在喝的东西里面。跟我一块儿干活儿的那家伙，原来确实一直是个站柜台的。他比我大，也比我内行得多。有次他对我说：“听着，我们总给安嘎那家伙送冰块儿，而他向来是一毛不拔——连一毛钱也不给。下次，他要冰的时候，别他妈理他。他呢，就会叫你过去给他上冰块儿，在他叫你过去的时候，你就说，‘哦，抱歉，瞧我这记性。人人都有忘事儿的时候。’”

我就如法行事，安嘎给了我一毛五！可是，现在，回想此事，我才意识到，站柜台的那主儿，就是内行的那个，确实会来事儿——让别人

去冒险找不自在。他派了个活儿给我，就是去训练那家伙给小费。他自己可一声不吭；他倒让我去做！

我必须得像个打杂的那样收拾餐厅里的桌子。你把从桌子上撤下来的那些东西，都摞在边上的一个大托盘里，摞得足够高的时候，就端到厨房里去。这样你再拿一个新托盘回来，对吧？你应该分两步来干这事儿——把原先那个托盘端走，再拿一个新的回来——但是，我琢磨着，“我得两步并做一步走。”于是我就想把新托盘垫在下边，同时把原先那个托盘抽出来，可是它滑到一边儿了——咣当！盘子碗儿奔地板那儿去了。接着，自然而然，问题来了，“你捣鼓个啥啊？怎么弄掉的啊？”嗨，我想发明一种新的端托盘的方法，可这事儿怎么解释啊？

甜点中有一种早餐点心，漂漂亮亮地放在小垫盒儿上，搁在盘子里。要是你到后边去，你会看到一个人，大家叫他配餐员。他的麻烦，是把东西准备妥当，好用来上甜点。这人以前必定是个矿工什么的——大块头，手指头又短又粗又硬又圆。他端着一沓小垫盒儿，用某种冲压工艺制造的那种小垫盒儿，全都扣在一块儿，他得用他那短而粗的手指头把它们掰开，好放在盘子上。我总听他说：“这些个倒霉的垫盒儿！”在他这么忙活的时候，我记得我心里在想，“多么鲜明的对比——有人守着桌子坐着，享受放在垫盒儿里的可爱的小点心，这位手指头短而粗的配餐员呢，在后面那儿嘟囔‘这些个倒霉的垫盒儿！’”世界真的是怎么样，和它瞧上去是怎么样，这两者之间，就有这个区别。

我来干配餐这活儿的第一天，配餐的那女的解释说，她通常是做火腿三明治的，为那些打夜班的家伙们做。我说，我喜欢吃甜点，要是晚饭上剩下甜点的话，就给我吧。第二天晚上，我打夜班到深夜两点，伺候那些打扑克的家伙。我这儿坐坐，那儿坐坐，没事儿可干，百无聊赖，猛然想起有甜点可吃。我就到冰箱那儿，开了门儿，她在里边放了六份儿甜点！一块儿巧克力布丁，一块儿点心，一些桃片儿，一些米饭布丁，一些果冻儿——全了简直！于是我就坐下来，吃这六份儿甜点——棒极了！

第二天，她对我说：“我给你留了份甜点……”

“妙，”我说，“绝妙！”

“但我给你留了六份儿，可不知道你最喜欢的是哪个？”

打那以后，她就留六份儿甜点。每天晚上，我来六份儿甜点。天天晚上不重样儿，但总是六份儿。

有一次，还是我站柜台的时候，一个女孩儿去吃饭，把一本书忘在柜台的电话机旁边，我就看这书。那是一本《达·芬奇的一生》，我不可能不看它；那女孩儿就把书借给了我，我把整本书都看了。

我在旅馆后面的一个小房间里睡觉，你离开屋子，得费心把灯关

了，可我连这个都记不住。受了达·芬奇那本书的启发，我制造了一个小玩意儿，那是一个由绳子和重锤（可乐瓶子装上水）组成的系统。我一开门，它就运作，拽动开关拉绳把里面的灯拉亮。你开门，这玩意儿就动，把灯弄亮；然后你随后把门关上，灯就灭。但我真正的成就还在后头呢。

我通常在厨房里切菜。菜豆必得切成三厘米长。你干这活儿的方法本来是这样：你把菜豆抓在一只手里，另一只手操刀，你把刀抵着菜豆和大拇指，弄不好就要把大拇指切掉。这切起来很慢的。于是我就在上面用了点儿心思，我想起了个好主意。我在厨房外边的桌子旁边坐下来，把一只碗夹在我膝盖中间，把一把快刀以背对我45度角插在桌子上。然后，我在刀两边各放了一堆菜豆，我拿了一根菜豆，一只手拿一根，然后飞快地往我这边拉，一拉菜豆就切断了，切断的菜豆就滑到夹在我膝盖中间的碗里。

我就这样一根一根地切菜豆——嚓、嚓、嚓、嚓、嚓——大家都把菜豆给了我，到我快切到第六十根的时候，老板过来了，“你捣鼓什么啊？”

我说：“瞧瞧我这切菜豆的招数！”——说时迟那时快，横在刀刃上的，不是一根菜豆，而是一根指头。血出来了，流到了菜豆上，这下可炸了锅：“瞧瞧，糟蹋了多少菜豆！这么干活儿，傻不傻啊！”夹七夹八的就来了。这样我就不可能进行改进了，而那很容易——弄个护板什么的——可是完了，没什么机会进行技术改造了。

我还有一项发明，困难也是相似的。土豆煮熟了，要切成片儿，好做某种土豆色拉。土豆黏糊糊的，颇难操作。我想到，用一大堆刀，平行地固定在架板上，往下一切，整个土豆就一下子成了片儿。我考虑这事儿考虑了很长时间，最后我想起了个主意，我可以把铁丝像这样固定在架子上啊。

于是我就到廉价商店打算买些刀或者铁丝，却真真地看到了我想要的那种玩意儿：是用来切鸡蛋的。下次来了土豆的时候，我就拿出了我的切蛋器，一眨眼的工夫就把全部的土豆切完了，然后送给厨子。厨子是个德国人，一个大胖子，厨房里的国王，他暴跳如雷，脖子筋都暴出来了，紫青的，“土豆怎么了啊？”他说，“怎么没切啊？”

我切了，但都粘在一块儿了。他说：“你叫我怎么把它弄开？”

“扔到水里，”我提了个建议。

“扔水里？哦、哦、哦、哦哦哦呵呵呵呵！”

又有一次，我有了个实在好的主意。当我站柜台的时候，我得接电话。有人打进来的时候，一个什么玩意儿嗡嗡地叫，总机上一个薄片儿吧嗒垂下来，这样你就知道是哪条线。有时候，就在我帮女人们摆桥牌

桌的时候，或者在下午三点来钟（那时电话不多）我坐在前门廊里的时候，突然有了电话，而我离总机还有一段距离。我就不得不跑着过去接，但是你必须从柜台后的走道上才能跑到总机那儿，先往下跑，然后转弯儿，再到柜台后边儿，这多跑了不少路，你这才回来看到电话是从哪儿打来的——这花了些额外的时间。

于是我想起了个好主意。我在总机上的那些薄片儿上系了一些线，这些线越过柜台垂下来，然后我在每根线上系上个小纸片儿。然后我把电话的受话筒向上放在柜台上，这样我从柜台外也够得着。现在，有人打进电话的时候，我一看哪个纸片儿往上走，就知道总机上哪个薄片儿垂下来，我就能及时接电话了，从柜台外接，省了时间。当然，我还是要绕回去接线，但至少我可以先搭句话。我说，“稍等片刻。”然后转过去接线。

我觉得这很完美，但是有一天老板娘过来了，她想接电话，可她琢磨不透——这也太复杂了。“这些个纸片儿，怎么回事儿？电话怎么搁到这边来了？你为什么不……哎哟喂、哎哟喂！”

我想解释——老板娘是我姑妈——想跟她解释这么做很有道理，但是对一个聪明人，一个经营这家旅馆的聪明人，这话说不得！那时我明白了：在现实世界上，发明创造，太难了。

谁偷了门？

在麻省理工学院，不同的兄弟会都有“抽烟聚会”，在那里他们都想把新生拉过去入伙儿。在我到麻省理工学院的前一个夏天，有人请我参加“费贝得”兄弟会（Phi Beta Delta），一个犹太人的兄弟会，在纽约开的一个会。那年头儿，如果你是个犹太人，或者是在犹太人家里长大的，你就没有机会参加别的兄弟会。别人都不瞧你一鼻子。我没什么瘾头要和犹太人打成一片，“费贝得”兄弟会的家伙们也不在乎我在多大程度上算是犹太人——实际上，我对这种事儿不相信的，宗教我是肯定不信的。无论如何，这个兄弟会的几个家伙问了我几个问题，并且给了我一个小小的建议——说是我必须参加一年级的微积分考试，那样我在将来就不必修这门课了——这到头来证明是个好主意。我喜欢从这个兄弟会来到纽约的这帮子伙计，也喜欢劝说我入伙的那两家伙，后来我们成了室友。

在麻省理工学院还有一个犹太兄弟会，名叫“西阿缪”（“SAM”），他们建议我坐他们的车到波士顿去，我也可以和他们待在一块儿。我答应搭他们的便车，头一晚上，我住在楼上的一个房间里。

第二天早晨，我朝窗外看了看，看到从另一个兄弟会来的那两家伙（我在纽约遇到的）正往台阶上走。“西阿缪”（Sigma Alpha Mu）兄弟会的几个伙计，跑出去跟他们说话，他们展开了一场好厉害的讨论。

我朝窗外喊：“嗨，我想我跟那些家伙是一伙儿的！”接着就跑出这个兄弟会，却没意识到他们都在大张旗鼓，争着拉我入伙。搭人家的便车，我也不怎么领情。

“费贝得”兄弟会在头一年几乎要倒台了，因为有两个不同的派系，把这个兄弟会扯成了两半儿。一派是社交名流，喜欢跳舞，跳完舞就开车傻转悠以及诸如此类的事儿；另一派，什么不干，光知道学习，从来不跳舞。

就在我要入伙之前，他们刚开完了一个大会，达成了一个重要的折中方案。他们还是一个战壕的战友，彼此都得照应着。每个人的功课，都至少要达到几等几等。如果有人落到了后头，老在学习的那些家伙，要给他们当老师，帮他们做作业。另一方面，每个人都得参加舞会，场场不落。要是有个家伙泡不到妞儿，别的家伙得给他弄一个。要是这个家伙不会跳舞，他们得教他怎么跳。一派教另一派怎么思想，而另一派的家伙们要教他们怎么社交。

就我而言，这不错，因为我不怎么会社交。我太怯场了，遇到我必须得出去发信却不得不从那帮子带着女朋友的高年级学生中间走过去的时候，我都头皮发麻：我都不知道怎么从他们旁边走过去！即便有个女孩儿说，“哟，他好可爱哦！”那也帮不上我什么忙。

不久就有大二的学生，带着他们的女朋友，以及女朋友的朋友，来教我们跳舞。又过了好长一段时间，有个家伙教我怎么开车。他们教我们这些学习好的人物怎么社交、怎么放松情绪，可真是教得辛苦；我们教他们，也同样辛苦。这样，两方面就扯平了。

“善于社交”，究竟是个什么意思，我还真难理解。这些善于社交的家伙，教我们怎么跟女孩儿相处之后不久，有一天我一个人在一家饭店吃饭，瞧见一个漂亮的服务员。我费了好大劲，鼓足了勇气，才有胆量请她在下次兄弟会的舞会上做我的舞伴，她说那敢情好。

回到了兄弟会，大家都在谈下次舞会的舞伴的事，我告诉伙计们，这次不劳各位费心了——我自己找到了一个舞伴。我对自己很是自豪。

等到高年级的发现我的舞伴是个服务员的时候，都目瞪口呆。他们对我说，这个不成；他们会给我找个“合适”的。他们让我觉得自己好像犯了迷糊，出了毛病似的。他们决定接管这局面。他们到了那家饭店，找到了那个服务员，告诉她，出局算了，他们给我找了另一个女孩儿。这么说吧，他们试图教育我这个“任性的儿子”，可我认为他们错了。我当时还是个新生，还不够自信，没能阻止他们毁了我的约会。

到我入伙了之后，他们就有各种各样的路数来糟蹋你了。他们做的一件事儿，是把我们的眼睛蒙起来，在隆冬季节把我们送到乡下好远的地方，把我们放在离一个冰封的湖100英尺（约30.5米）那儿。我们整个儿找不着北了——没人家，什么也没有——可我们应该找到回到兄弟

会的路。我们有点儿怕，因为我们还小，大家都不怎么说话，除了一个名叫毛里斯·梅耶的家伙：你没办法不让他说笑话，不用双关语，也没办法不让他抱那种随遇而安的态度：“哈，哈，有什么大不了的。这不很好玩儿吗！”

大家都对毛里斯动了气。他总是稍稍落在后边，对目前的整个局势大笑不止；其余的人呢，真不知道怎么才能摆脱这种困境。

我们走到了离湖不远的一个十字路口——还是没人家，什么都没有——别人都在讨论我们是否应该走这条路，还是那条路，这时候毛里斯赶上来，说：“走这条路。”

“你知道个屁，毛里斯！”大家无可奈何地说。“你总是开这种玩笑，我们为什么应该走这条路？”

“简单：看看电话线。哪边儿的电话线多，哪边儿就是总机。”

这家伙，看起来什么也不往心里去，可这主意够棒的！我们一溜烟地回了城，没走一点冤枉路。

明天即将有一场全校范围的新生对老生的泥巴大战（在稀泥里进行的各种各样的摔跤、拔河）。晚上很晚的时候，一大群大二的学生，有的是我们兄弟会的，有的是从外边来的，到了我们兄弟会来——来绑架我们：他们想把我们搞得精疲力尽，好让他们在明天取胜。

大二学生们把全体新生捆了个结实，不费吹灰之力——我是例外。我不想让兄弟会看出我是个“娘娘腔”。（我对运动从来不在行。网球跃过球网，在离我很近的地方落地的时候，我总是不知所措，因为我不能把它打过球网——球通常是奔到离它该去的地方一弧度角的地方。）我琢磨出来了，这是个新境地，一个新世界，我也可以创造一个新名声。因此，为了不显得我不知道怎么打架，我使出浑身解数，跟个王八蛋似的玩命（不知道自己在干什么），三四个人费了不少事，才把我捆住。大二学生们把我们押到树林深处的一栋房子里，用铁扣把我们固定在了木地板上。

我想方设法想逃跑，但有大二的学生看着呢，我那些谋略一样也不管用。我记得很清楚，有一个家伙，他们没敢绑他，因为他太害怕了：他脸都绿了，浑身筛糠。我后来发现，他从欧洲来——那时是20世纪30年代——他没意识到，把这些家伙都固定在地板上，不过是某种玩笑；欧洲那些可怕的事儿，他都知道。这家伙吓得让人不忍心看，他简直吓傻了。

黑夜即将过去，只有三个大二的学生看着我们二十个新生，但我们不知道这个。大二学生们开着汽车里出外进好几趟，弄出好些动静，好像有不少活动似的，可我们没注意车总是那几辆车，人总是那几个人。因此，我们没办得了他们。

那天上午，我父母碰巧来看看他们的儿子在波士顿过得怎么样，兄弟会糊弄了他们一阵子，直到我们被松了绑回来。我拼死拼活想逃跑，加上睡眠不足，只落得个满脸憔悴、浑身邋遢。儿子在麻省理工学院是这副尊容，着实让二老惊讶不已！

我脖子也落枕了，我记得那天下午，我歪着脖子在“后备军官训练队”排队等着检查。那位司令官抓住我的脑袋瓜子，把它扳正，喝道，“挺直！”

我缩着身子，肩膀歪着：“长官，我做不来！”

“哦，对不起！”他说，有些歉意。

无论怎么说，我战斗了这么长时间，不甘心束手就擒，这个事实为我赢得了了不得的名声，我再也不需要操心被人骂作娘娘腔了——真是如释重负啊。

我经常听我的室友说话——他们俩都是老生——谈他们的理论物理课的事。有一天，他们为一件事情费劲不少，可那件事对我来说再清楚不过，我就说，“你们为什么不用巴伦纳莱方程式？”

“那什么玩意儿？”他们叫起来，“你在说什么啊！”

我跟他们解释我什么意思，它在这个问题中有什么用，它能解决这个问题。到头来，他们明白了我的意思，是伯努利[4]方程式啊，但我是从百科全书上读到这个东西的，以前跟谁也没讲起，因此我不知道怎么读准那个词儿。

但我的室友很兴奋，从那以后，他们就和我讨论他们的物理学问题——不幸我没有机会接触他们许多人——第二年，我也修这门课，进步很快。琢磨高年级的问题，跟他们学怎样发音发得准，这是个受教育的好方法。

我喜欢在星期二晚上到一个叫“雷莫”和“普累莫”的地方——这是相邻的两个舞厅。我兄弟会里的哥们儿不去这种“社会上的”跳舞场所；他们偏爱自己的舞会，在那儿，他们带来的女孩儿属于上流社会，是他们以“得体的”方式遇到的。我在什么时候遇到一个人，她们从哪儿来，背景怎么样，我全不在乎，所以我就去那种舞厅——尽管兄弟会里的哥们儿对此不很赞同（我那时已经三年级了，他们也挡不住我）——而我玩儿得很高兴。

有一次，我和一个女孩儿跳了好几个舞，却没跟她说太多的话。最后，她对我说，“你虎跳灰常好。”

我听不大懂她说什么——她说话有障碍——但我以为她是说，“你舞跳得非常好。”

“承蒙夸奖，”我说，“谢谢。”

我们走到一个桌子那儿，她的一个女友，以及和这个女友跳舞的男孩儿在那儿，我们就坐下来，四个人都坐一块儿。这两个女孩儿，一个重听，另一个几乎是聋的。

这两个女孩儿谈话的时候，前前后后飞快地做出好多手势，也咕哝一点什么声音。这没使我闹心，跟我跳舞的这个女孩儿，舞跳得好，人也好。

跳了几支舞，我们又坐在桌子那儿，又来了好多的手势，一前一后，一前一后，一前一后的，直到最后，她对我说了点儿什么，我也能猜出她什么意思，她是说，她希望我们俩带她们俩到某家旅馆去。

我就问另一个家伙愿不愿意去。

“她俩要咱俩到那家旅馆去干嘛啊？”

“见了鬼了，我怎么知道。我和她谈得也不多啊！”

但我也不必知道得很清楚。不就是玩儿嘛，骑着毛驴看唱本儿，走着瞧啊；一场冒险哦！

另外那家伙心里发怵，他说他不去。我就把那两女孩儿弄上出租车奔了旅馆，却发现那里有一场聋哑人组织的舞会，信不信由你。他们都属于一个俱乐部。结果我发现，他们有许多人能根据感觉到的节奏跟着音乐跳舞，在每支曲子结束的时候，还向乐队鼓掌呢。

这可太、太有意思了！我觉得自己好像在异国他乡，不会说那儿的话：我能说话，但没有人听得见我说什么。每一个人都跟其他人用手势说话，而我什么也明白不了！我让我的那个女孩儿教我几个手势，我也学会了好几个，就跟你学外语似的，仅仅是为了好玩儿。

大家都兴高采烈，互相之间，也很放松，不停地开玩笑啊，笑啊；他们随心所欲地这样那样交流，不显得有什么真正的困难。这和任何其他语言是一样的，只有一件事是例外：在他们互相做手势的时候，头总是一会儿转到这边儿，一会儿转到那边儿。我明白了那是怎么回事儿。当有人想在边儿上插话，或者想打断你的话头儿的时候，他不能嚷：“嗨，杰克！”他只能做一个手势，备不住你看不到这个手势，除非你习惯于一直眼观六路。

他们互相之间，都非常自在。不自在，却成了我的问题。这是一次很好玩儿的经历。

舞会持续了好长时间，舞会一结束，我们就到了一家饭店。他们要什么，都拿手指头指那东西。我记得有人用手势问：“你—从—哪儿—

来？”我那位女孩儿就拼出了“纽—约”。我仍然记得一个家伙跟我打手势“你很有风度啊！”——他跷起大拇指，又触动一下一个在想象中的西服翻领儿，这表示“风度”。他们可真有一套。

大家都围坐着，开玩笑，我不知不觉地就跟他们打成一片。我想买一瓶牛奶，于是我就到站柜台那主儿那儿，用口形说“牛奶”，但不出什么声音。

这家伙不明白。

我就弄了个关于“牛奶”的象征姿态，握着两个拳头动来动去，看那架势，好像我在挤母牛的奶似的，而他仍然不知道我搞什么名堂。

最后，旁边一个不认识的人要了牛奶，我就拿手指那牛奶。

“啊！牛奶呀！”他说，我点头，意思是“是啊”。

他递给我一瓶牛奶，我说：“非常感谢！”

“你个王八蛋！”他说着，笑了。

我在麻省理工学院的时候，常常喜欢跟人家恶作剧。有一次，在机械制图课上，有个喜欢逗乐的家伙，拿起个曲线板（一个塑料板儿，好用来画平滑的曲线，样子挺古怪的一个玩意儿），说：“我闹不明白，这玩意儿上的曲线，是不是有特别的方程式？”

我想了一会儿，说：“当然有啊。那些曲线是非常特别的曲线。让我弄给你看。”我就把我的曲线板拿起来，开始慢慢转动。“曲线板之所以造成这么个样子，是因为每一条曲线的最低点，无论你怎么转，它的切线总是水平的。”

全班的家伙们都以不同的角度，把他们的曲线板举起来，拿着铅笔跟曲线板的最低点凑合一块儿，然后比画着，他们发现，可不是嘛，切线就是水平的啊。他们都为这个“发现”欢呼雀跃——尽管他们学了不少微积分，也已经“了解”到任何曲线的最小值（最低点）的斜率（切线）都是零（水平的）。他们不是根据事实推理。他们甚至不知道他们“知道”的东西。

我不明白大家是怎么了：他们不是通过理解事情来学习，他们凭别的什么方式来学习——凭生搬硬套，或者别的什么名堂。他们的知识如此脆弱不堪！

四年后，我在普林斯顿大学，又把这个恶作剧如法炮制了一遍。当时我在跟一个挺老练的人物拉话儿，他是爱因斯坦的助手，确实一直在忙活关于引力的事情。我给他出了个难题儿：你坐在火箭里，给崩上了天，火箭里有个钟，地上也有个钟。我的意思是：地上的那个钟报告过

去了一小时的时候，你必须回到地面。现在，你所希望的是，当你往地球这儿赶的时候，你火箭上的那个钟，一定要尽可能地比地上的那个快。照爱因斯坦的说法，你跑得越远，你的钟就越快，因为一个在引力场中的东西走得越远，它的钟就走得越快。但是，如果你企图飞得过分远，因为你只有一个小时的时间，那你不得不非常快地到那么远的地方，速度快到把你的钟都减慢了。问题是：你究竟采取什么速度和远近，才能使你的钟上的时间过得最少？

爱因斯坦的这位助手，忙活了好一阵子，才意识到答案就是一般的运动。如果你以惯常的方式把一个东西抛上了天，要它上去和下来所需要的时间是一小时，那么这就是正确的运动方式了。这就是爱因斯坦引力的根本原理——那就是说，被称作“本位时间”的玩意儿，对于那条实际的曲线而言，是处在最大值上的。可是，当我把这个说给他听，用一个带着钟的火箭的方式说给他听，他却没明白我说的是什么。这和在机械制图课上的那些家伙的情况差不多，但这次可不是一些木头脑瓜子的大一新生啊。所以说，这种脆弱的情况，事实上，很是普遍，甚至比较有学问的人，也是如此。

无论我是新生还是老生，我通常在波士顿的一家饭店里吃饭。我自己去那儿，常常连续几个晚上都去那儿。大家对我也熟悉了，给我上菜的服务员总是同一个人。

我注意到她们总是急匆匆地，忙得团团转，因此，有一天，仅仅是为了好玩儿，我把小费（通常是一毛，那年头儿通常就是这个数儿），两个五分硬币，分别放在两个玻璃杯子的里头：我把两个杯子都装满了水，满满的，把硬币扔进去，然后盖上一张扑克牌，反过来，底儿朝上，放在桌子上，然后我抽掉扑克牌（水漏不出来，因为空气进不去——杯子边儿紧扣在桌面上，所以才这样）。

我之所以把小费放在两只杯子底下，是因为我知道她们总是急匆匆地。如果小费是一枚一毛硬币，扣在一只杯子下面，那么女服务员急着为后来的顾客收拾桌子，就会拿起杯子，水流了出来，事儿也就完了。可是，在她把第一只杯子弄得洪水泛滥之后，她究竟会怎么对付第二只杯子？她现在可就没有坚强的神经，来把第二只杯子拿起来了！

我出门的时候，对我的女服务员说：“苏，当心点儿。你给我的那两只杯子，有点儿好玩儿——水都装得满满的，杯子底儿却敞开着！”

第二天我回来了，上菜的是一个新服务员。通常为我服务的那个，对我不理不睬。“苏生你的气了，”我的新服务员说，“她把第一个杯子揭开后，水流得到处都是，她把老板喊了出来。他们研究了一阵子，可他们不能花一天的工夫琢磨这个啊，所以他们最后把另一只杯子也拿起来了，水又流出来了。他们都跟你急眼了。”

我笑。

她说："有什么好笑的！要是别人跟你也来这一套，你什么感觉——你怎么办？"

"我会去找个汤碗来，然后小心翼翼地把杯子滑到桌子边儿上，把水放在汤碗里——水不必往地板上流嘛。这样呢，我就把硬币取出来了。"

"哈，这主意不赖。"

那天晚上，我把小费扣在了一只咖啡杯子下边，杯子底儿朝天，扣在桌子上。

第二天晚上我来了，为我服务的，还是新来的那位。

"上次，你把咖啡杯子倒扣着，什么意思啊，你？"

"那个，我琢磨着，尽管你活儿忙，你还是不得不到厨房去拿个汤碗；然后呢，你就不得不慢慢儿慢慢儿、小心翼翼地把杯子滑到桌边儿……"

"可不就那么办的嘛，"她发开牢骚了，"可里头没水啊！"

我捣蛋的杰作，是在兄弟会里搞的。有天早晨，我醒得很早，大概五点来钟，睡不着了，于是我就从寝室溜下楼，发现绳子上挂着一些告示，说的是"门！门！谁偷了门？"之类。我看到某人把门从合叶上摘走了，在门原来的地方，挂着个标牌，上面写着，"请把门关上！"这个标牌本来是挂在那个不翼而飞的门上的。

我立刻琢磨出了个主意。在那个房间里，有个叫彼得·伯内斯的，还有另外两个家伙，都非常用功，总希望静悄悄的。如果你溜达到他们屋子找个什么玩意儿，或者问他们怎么解决什么什么问题，当你告辞的时候，你总听见这几个家伙尖叫，"请把门关上！"

毫无疑问，某人烦了他们这一套，把门给弄走了。这屋子碰巧有两道门，于是我有了个主意：我把另一个门从合叶上摘下来，扛到了楼底，把它藏在地下室油桶的后面。然后，我悄悄回到楼上，上了床。

早上晚些时候，我装模作样地好像才起床似的，稍晚下了楼。别的家伙都在到处乱转悠，彼得和他的两个朋友都气坏了：他们的两道门都没了踪影，他们得为这个研究研究了，叽叽咕咕，叽叽咕咕。我正下楼梯呢，他们说，"费曼！你把那两个门拿走了？"

"啊，是啊！"我说，"是我拿了那个门。瞧，我手指节都擦破了，我把那门搬到地下室的时候，手蹭在墙上，都蹭破了。"

他们对我的回答不满意。事实上，他们不相信我。

拿走了第一个门的那几个家伙，已经留下了许多线索——比方说，

标牌上的字迹——他们很快会被发现出来。我的主意是：当大家发现是谁偷了第一个门的时候，人人都会认为他们也偷了第二个门。果不出所料：大家给偷了第一个门的那几个家伙一顿老拳，外加折磨、审问。直到最后，吃了不少苦头，费了不少事儿，他们才让那些折磨他们的人相信，他们只偷了一个门，虽然这或许很难让人相信。

我听着这一切，心里偷着乐。

另一个门，失踪整整一星期，对还想在那屋子里学习的家伙们来说，找到另一个门，这事儿变得越来越重要。

到末了，为了解决这问题，兄弟会会长在晚饭时候说："关于另外那个门的问题，我们必须解决。我自己解决这问题，怕是无能为力。因此呢，我愿意听听你们各位的高见，把这事儿弄出个头绪，因为彼得和另外两个人要学习啊。"

有人提出了个建议，然后又有一个人提出建议。

稍做沉吟，我站起来，提了个建议。"好吧，"我连讽带刺地说，"无论是谁偷了这门，大家都知道你很厉害。你太聪明了！我们琢磨不出你是谁，因此，你必定是个某种超级天才。你大可不必告诉我们你是何方神圣；我们想知道的，是这门在哪儿啊。所以，如果你在什么地方留下个条子，告诉大家那门在哪儿，大家就承认你是爷，永远承认你是一个超级神人，你可太聪明了，你能把那另一个门弄走，可大家琢磨不出来你是哪位。但给上帝一点面子吧，在什么地方留个条子吧，我们将为此永远感激你。"

下一个家伙也提了一个他的建议："我倒有另外一个主意，"他说，"鄙人以为，你，作为会长，应该要求每一个人，以本兄弟会的诚实誓言为重，问问各位，他偷还是没偷那个门。"

会长说："这主意非常好。以本兄弟会的诚实誓言为重！"于是他就围着桌子走，逐个地问每个家伙："杰克，你拿了那门吗？"

"没有，先生，我没拿那门。"

"迪姆，你拿了那门吗？"

"没有，先生，我没拿那门！"

"毛里斯，你拿了那门吗？"

"没有，我没拿那门，先生。"

"费曼，你拿了那门吗？"

"是啊，我拿了那门。"

“你省省，费曼；这不是开玩笑！山姆！你拿了那门吗……”——这么问了一圈儿。大家都震惊了。这兄弟会里，必定有一只真正的老鼠，他不尊重本兄弟会的诚实誓言！

那天晚上，我留下了一个纸条儿，上面画了一幅小画儿，画的是那个油桶，紧挨着油桶的是那个门，第二天他们找到了那个门，把它又安了上去。

一段时间以后，我终于承认拿了那另一个门，我受到了大家的指责，说我撒谎。他们记不起我曾经说过什么话。他们能够记得的全部事情，是会长在围着桌子走了一圈儿问过每个人之后所下的那个结论，没人承认拿走了那门。这个结论，他们记得；当时我说了什么，他们记不得。

大家经常认为我弄虚作假，但我通常是诚实的，某种方式的诚实——这么一种方式的诚实，竟然常常没人相信！

拉丁语还是意大利语？

布鲁克林有家意大利语电台，我还是小孩子的时候，总听它。我喜欢它那抑扬起伏的声音扑面而来，我宛如在大海边，波浪不太大。我通常坐在那儿，一任海水向我涌来，把自己沉浸在漂亮的意大利语中。在这些意大利语节目中，总有某种家庭场景，妈妈和爸爸之间发生了讨论或者吵架：

尖尖的声音说：“尼奥特卡提叶托卡皮托图土……”

洪亮而低沉的声音说：“布饶托恩尼帕拉图土！”（伴随着用手击打出来的声音。）

太棒了！因此我学会了做作各种感情：我可以哭；我可以笑；诸如此类。意大利语是一种怪可爱的语言。

在纽约，有不少意大利人住在我们附近。每当我骑自行车的时候，有的意大利卡车司机就把脑袋探出驾驶室，手还比画着，叫着类似这么一种声音：“米啊如查拉姆皮伊塔提车！”

我觉得自己像个傻瓜。他对我说什么啊？我怎么回敬他？

于是我就问我学校里的一个意大利朋友，他说：“你就说，‘啊提！啊提！’——意思是‘你才是呢！你才是呢！’”

我觉得这主意不赖。我可以说“啊提！啊提！”给他顶回去——当然，也得拿手比画着。于是我就获得了自信，而且我还培养了另外一些本事。要是骑车出去，某个开车的女的挡了我的道，我就说：“普齐呀啊

拉玛罗车！”——看她不蔫儿！有个意大利坏小子，骂她如此之凶！

别人想听出我说的是假冒的意大利语，不那么容易。有一次，那时我在普林斯顿大学，我骑着自行车去帕尔默实验室的停车场，有人挡了路。我的习惯总是这样：我向那家伙比画，“噢瑞则卡帮卡米车！”用一只手的手背，猛击另一只手。

在一大块草坪的另一边，一个意大利园丁正忙着栽什么植物。他停下手里的活儿，挥着手，兴高采烈地喊：“瑞咋玛里亚！”

我向他喊：“让提巴尔塔！”也向他打招呼。他不知道我不知道意大利语，我不知道他说的是什么，他也不知道我说的是什么。但没关系！简直绝了！这招儿管用！他们听到那种语调的时候，毕竟立刻就听得出来那是意大利语——或许是米兰方言吧，不是罗马方言，管它是什么方言。可他是个意大利人！所以这就很好玩儿。但你必须绝对自信。你自顾自地说下去就成，不会出什么破绽。

有一次我放假回家，我妹妹有几分不高兴，几乎要哭了：她们女童子军要举行父女宴会，但爸爸出门在外卖制服，在路上呢。于是我说，我带她去，以哥哥的身份（我比她大9岁，所以这也不算脑袋发热）。

我们到那儿的时候，我在那些爸爸们中间坐了一会儿，但很快就烦了他们。全部的爸爸都是带着女儿来参加这个可爱的小小宴会的，但他们都在讨论股票的事儿——他们不知道怎么和自己的孩子说话，更不知道怎么和孩子的朋友们说话。

在宴会过程中，小姑娘们为我们表演了一些小剧儿，还背诵诗歌，等等。突然，她们拿出了个样子古怪、有点儿像围裙的东西，靠上有个窟窿可以套在头上。小姑娘们宣布，现在得由爸爸们为她们表演节目。

这么说，每个父亲都必须站起来，把头套在那个围裙里，说点儿什么——有个家伙背诵“玛丽有一只小羊”——他们都不知道表演什么才好。我也不知道做什么好，但等到我站在那儿，我告诉她们，我要背诵一首小诗；抱歉的是，那不是英语诗，但不管怎么样，我保证她们会喜欢的。

啊，图佐兰托——颇伊齐·迪·帕热

弹托萨卡图尔那提，那普塔于西普提提拉

如恩托卡塔产托产塔满托尺拉提大

牙塔卡热苏尔达米拉查塔皮查皮诺提诺布啊尔达

皮特尺那那那春大拉拉亲大拉拉春大！

让托皮提卡拉，啊弹诺亲托昆塔拉尔达

啊，拉提恩塔大拉拉尔塔，因塔普茶拉拉塔尔塔！

我就这么朗诵了三四段，运用我从意大利语电台那里听来的所有感情，把孩子们搞得莫名其妙，她们乐得前仰后合，哈哈大笑。

宴会结束后，女童子军团长和学校的一个老师走过来，告诉我说，她们一直在讨论我的诗。她们有一位认为那是意大利语，另外一位认定那是拉丁语。那位老师问："谁说得对啊？"

我说："你们一定得去问问小姑娘们——她们立刻就知道那是什么语言。"

总想逃避

我在麻省理工学院当学生的时候，只对科学感兴趣；别的事情，我全不擅长。但学院有个规矩：你必须得修一些人文课程，以便得到更多的"教养"。除了英语课之外，还有两门选修课，于是我就浏览选课表，立刻发现了天文学——这竟然是人文课啊！因此，那年我选了天文学，算是逃过一难。第二年，我再往那张选课表下边瞧，在法国文学这样的课的后边，我发现了哲学。那是我能找到的最接近科学的课。

在我告诉哲学课上发生了什么事情之前，让我告诉你一些英语课上的事儿。我们不得不写好几篇作文。比方说，穆勒写过关于自由的什么玩意儿，我们呢，必须批评他。但我不是像穆勒[5]那样论述政治自由，我却写在社交场合中的自由——为了显得礼貌不得不装模作样和撒谎这个问题，以及在社交场合总是做这种装模作样的游戏，将导致"社会道德意志力的崩溃"这问题。这是个很有趣的问题，但这不是布置给我们的题目。

另一篇我们必须批评的文章，是赫胥黎[6]的《论一截儿粉笔》，他在这篇文章中，讲的是他拿着的那截儿粉笔，是动物骨头的遗留物，地球内部的力量把它往上推，所以它才成了白崖的一部分，然后呢，它被采挖出来，如今被用来在黑板上写写画画，传达思想观念。

还是那样，我不按照教授布置的那样去批评这篇文章，却写了一篇滑稽的模仿之作《论一粒尘土》，说的是一粒尘土是怎么弄成了多彩的落日，怎么有助于雨滴的凝结，诸如此类。我总是造假货，总是想逃避。

但是，到了我们不得不写一篇关于歌德的《浮士德》的作文的时候，我就无计可施了！这作品太长了，模仿不得，没办法挂羊头卖狗肉了。我在兄弟会里反复吼叫："我做不了。我不想写了。我不弄了！"

我兄弟会里的一哥们儿说："行了，费曼，那你别做得了。可教授会以为你不写，是因为你懒得做这作业。你怎么着也得写个什么玩意儿——还不能少于规定的字数——交上去的时候，夹张纸条儿，说你就是理解不了《浮士德》，你对它还不开窍，要写点儿评论它的东西，不大可能。"

我就这么办了。我写了一篇很长的作文，《论理性的限度》。我一直都在思考解决问题的科学技术，怎么会有某种限度：道德价值问题，不能由科学方法来决定，呜啦哇啦、呜啦哇啦，一通胡诌。

然后，兄弟会的另一哥们儿，又出了个主意。"费曼，"他说，"交上一篇作文，却跟《浮士德》风马牛不相及，交不了差的呀。你要做的事情，是把你写的那什么玩意儿，搞进《浮士德》里去。"

"滑稽！"我说。

但兄弟会的其他家伙们，以为这是个好主意。

"好吧，好吧！"我硬着头皮说，"我试试还不成吗？"

于是，我在我已经写了的那些东西上，又加了半页，说是墨菲斯托菲里斯7代表理性，浮士德代表精神，歌德试图表明理性的限度。我一阵折腾，把折腾出来的玩意儿，都勉强塞进了作文里。

教授让我们一个一个单独进去和他讨论作文。我进去了，做好了最坏的心理准备。

他说："导言部分的材料，不错；但《浮士德》的材料，有点儿过于简单了。否则，还是很好的——B+。"又逃过一难！

现在说哲学课。这课是一个老胡子教授讲的，名叫鲁宾逊，他老是嘟嘟囔囔地说话。我去听课，他也那么嘟嘟囔囔，而我什么也听不明白。班里别的人似乎更明白一点儿，可他们似乎精神不集中。我碰巧有一把小锥子，大约十六分之一英寸（1英寸＝2.5厘米）的那种，就拿它来在课堂上打发时间，在两个手指头之间，在鞋底上钻窟窿，一星期一星期这么混。

最后，有一天，接近下课的时候，鲁宾逊教授"咿哩哇啦、咿哩哇啦、咿哩哇啦、咿哩哇啦"——大家都兴奋起来！他们都互相交谈、讨论，因此我猜他说出了什么有趣儿的话，谢天谢地！可他说了什么啊？

我问了一个人，他们说："我们得写一篇文章，四个星期后交差。"

"写什么？"

"写一年来他讲过的那些东西。"

我傻了眼。整个学期，我记得，我听到的唯一的东西，是有那么一次，教授一下子来了兴致，“咿哩哇啦咿哩哇啦意识流咿哩哇啦咿哩哇啦，哇啦，”哎哟喂！——然后又是乱七八糟的。

这个“意识流”，让我记起了若干年前我爸爸交给我的一个问题。他说，“假定一些火星人将要光临地球，而火星人从来不睡觉，他们一刻不停地动弹。假定他们没有我们这种名为睡觉的怪异现象，于是他们就问你这个问题：‘入睡是个什么感觉？当你入睡的时候，发生了什么事儿？你的思想是突然停止了呢，还是逐渐逐渐逐渐不啊不不啊不那么迅迅迅速？这个心灵到底是怎么关了开关的？’”

我觉得有意思哦。现在，我必须回答这么一个问题：当你入睡的时候，意识流是怎么停止的？

就这样，在接下来的四个星期的每个下午，我都得写我的作文。我把我屋子里的遮阳帘拉下来，把灯也关了，睡觉。我倒要看看，当我入睡的时候，发生了什么。

在晚上，又睡，因此每天我有两次观察的机会——很不错！

起初，我注意到了许多和入睡无关的鸡毛蒜皮的事情。比方说，有一次，通过在内心里对自己说话，我思考了不少。我还能想象我看到了许多东西。

然后呢，我逐渐累了，我注意到我能同时想两个事儿。我是在这么个时候发现这个的：我在内心里对自己谈论着什么事儿，而我同时也在做那件事儿，我漫不经心地想象到了两根儿绳子，分别系在我的床头和床尾上，绳子卷在一个转动的辘轳上，慢慢儿地把我的床往上升。直到我担心一根儿绳子别和另一根儿绞在一块儿，那样就卷不利索了的时候，我才意识到那两根儿绳子原来是我想象的。但是，我说，在内心里，“哦，绳子上的张力自然不会让它们绞在一块儿的”，可这干扰了我正在进行的第一个思想，并使我意识到，我正在同时想着两个事儿。

我还注意到，当你入睡的时候，思想观念还在继续，但它们之间的联系，变得越来越不讲逻辑。你没注意到它们之间的联系越来越不讲逻辑，直到你问你自己：“我怎么鬼使神差地想到了这个啊？”然后，你试图回头考察一番，可你常常记不得到底是什么玩意儿使你想到那个！

就这样，你得到了逻辑关系的每一种幻觉，但真正的事实是：那些思想变得越来越醉眼蒙眬，到最后它们完全分崩离析，再往后，你已然沉沉睡去。

一直睡了四个星期的觉之后，我开始写我的作文，解释我得到的观察结果。在文章的结尾部分，我指出，所有这些观察，都是正在观察我自己入睡的时候得到的，我并不真的知道入睡究竟是怎么样的，我睡了的时候，我没在观察我自己啊。我以我自己拼凑的一首小诗来表达这篇

文章的结论，它指出内省有多么难：

我纳闷为什么。我纳闷为什么。

我纳闷我为什么纳闷。

我纳闷为什么我纳闷为什么

我纳闷为什么我纳闷！

大家都交了作业，下次大家上课又都凑一块儿了，教授读了其中的一篇："嗯啊哇啦嗯啊哇啦……"我说不上来这家伙写的什么。

他又读了另外一篇："咿哩哇啦嗯啊哇啦哇啦……"我也不知道这家伙写的什么，可到末了，他念道：

啊哇啦哇。啊哇啦哇。

啊哇啦哇啦哇啦。

我哇啦乌啊哇啦哇

啊哇啦哇啦哇啦。

"啊哈！"我说。"那是我的作文啊！"实话实说，到最后，我才听出那是我的。

文章我是写完了，可我的好奇心还在继续，在我去睡觉的时候，还是坚持观察我自己这种搞法。一天晚上，我正在做梦，我意识到我在梦中正在观察自己呢。我把一切都一股脑儿地弄进了睡眠本身当中！

在这梦的头一部分，我在一列火车顶上，火车正冲向一个隧道——呜的一声！我对自己说："这么着，你可以体会到害怕的感觉；火车进了隧道，你还能听出声音的变化。"

我还注意到，我能看到颜色。有人说，梦是黑白的，但不是的，我的梦是彩色的。

现在，我在一个车厢里，我感觉到，火车摇摇晃晃。我对自己说："你在梦里可以有肌肉运动知觉。"我费了点儿事儿，走到了车厢一头儿，我看到了一扇大窗户，跟商店橱窗似的。窗户后面——不是塑料假人儿，而是三个活生生的女孩儿，穿着游泳衣，而且长得都很漂亮！

我继续走到下一个车厢，一边走一边拉着头顶上的吊环，那时我对自己说，"嗨！搞得兴奋起来——性兴奋——会很好玩儿——所以我想，还是回到刚才那个车厢吧。我发现我能转弯儿，沿着火车往回走——我能控制我的梦的方向。我回到了那个窗户特别的车厢，看到三个老家伙

在拉小提琴——但他们又变成三个女孩儿！所以，我能修改我梦的方向，但修改得不完美。

那个，我开始兴奋起来，在性方面，也在智力方面，我说：“哇！它管用哦！”我就醒了。

我在做梦的时候，还得到了另外一些观察结果。除了老是问我自己：“我真的梦到彩色了吗？”我还纳闷：“你看到什么东西的时候，看得准不准？”

下一次，我梦见了一个女孩儿，躺在草丛里，她的头发是红色的。我想知道，我能不能看清楚每根儿头发。你知道，当有阳光照着的时候，只有一小块儿是有颜色的——所谓衍射效应，我能看到那个！我能随便把每根儿头发看得真真切切：完美的视觉！

另有一次，我梦见一枚图钉按在门框上。我看到了这枚图钉，我的手指头沿着门框往下滑，接着就触摸到了那图钉。这么说，大脑的“视觉部”和“触摸部”似乎是连在一块儿的。于是我对自己说，这两个部不连在一块儿，是可能的吗？我又看那门框，图钉没了，我的手指头沿着门框往下滑，而我摸到了图钉！

还有一次，我在做梦的时候，听见“砰砰，砰砰”。梦中发生了什么事儿，和这敲门声合拍了——但合得不怎么完美——那声音好像是从外面来的。我想：“我敢绝对保证，这敲门声是从我的梦外边来的，而我设计了梦的这一部分与之相合。我一定得起来，看看究竟是什么事儿。”

敲门声还在继续，我醒了——死寂一片。什么事儿也没有啊。这么说，这敲门声跟外界没关系啊。

别人告诉过我，他们曾经把外边的声音结合到了梦里，但是，当我有了这样的经历的时候，仔细地“从下面观察”，拿得准那声音是从梦外面来的，然而却不是。

在梦中做观察的那段时间里，醒来的过程挺可怕的。正当你开始醒来的时候，有那么一刻，你觉得身体僵硬，跟绑在床上似的，也好像被压在好几层棉絮下面。这很难解释，但有那么一刻，你有一种憋在里边的感觉；你不敢肯定你能不能醒来。你总是能够醒来。在告诉了我自己好多遍之后，我变得越来越不害怕了，而且实际上我发现醒来的过程很是令人振奋——有点儿像坐过山车：过上一些日子，你不那么害怕了，你有点儿喜欢它了。

或许你想知道，这种观察我自己的梦的过程，是怎么停下来的（在这样的过程中，我大多数时间是在观察；这种事情只发生过几次而已）。有一晚上，我像往常那样做梦，我看到在我面前的墙上，有一面细长的三角形的航海信号旗。我回答了25遍了：“是的，我梦见了颜色。”然后，我意识到自己睡的时候，后脑勺硌在黄铜杆儿上。我把手垫

在脑袋下，我感觉到我的后脑勺是软的。我想："啊哈！那就是我一直能在梦中进行观察的原因啊：那个黄铜杆儿，干扰了我的视觉脑皮层。我要做的，仅仅是枕着黄铜杆儿睡觉即可，那样我就能在任何我想观察的时候做这些观察。于是，我想，我要停止对这件事的观察，然后进入比较深度的睡眠。"

过一阵子，我醒了，没什么黄铜杆儿，我的后脑勺也不是软的。我不知怎么已经厌烦了做这样的观察，而我的大脑，也就发明了一些虚假的理由，告诉我为什么我不应该再观察了。

作为这些观察的结果，我开始弄了一个小小的理论。我喜欢看自己的梦，原因之一是我好奇，好奇的是，当你闭着眼、什么也没进来的时候，你是怎么看到一个形象的，比方说，一个人的形象。你说，那或许是随机的，是无规则的神经放电。但是，你没办法在你睡觉的时候，让你的神经以你醒着看东西时的同一个细腻的模式来放电。那么，我在睡觉的时候，我怎么可能"看到"颜色，而且看得更细致？

我料定，必定有一个"翻译部"。当你真的在看什么东西的时候——看一个人，一盏灯，或者一面墙——你看到的不仅仅是一些色块儿。有个什么东西告诉你那是什么玩意儿；那玩意儿必得经过翻译。在你做梦的时候，这个翻译部仍然在运作呢，但它变得稀里咣当。它告诉你，你正在看一根儿人类的头发，看得再细致不过，可那时你什么也没看。它把那些进入大脑的东一块儿西一块儿的下脚料，翻译成了一个清晰的形象。

关于梦，还有一件事儿要说。我有个叫达伊弛（Deutsch）的朋友，他媳妇出身于维也纳的一个精神分析世家。有天晚上，讨论梦讨论了好长时间，他说梦是有意义的：梦里有象征，象征可以用精神分析方法得到解释。这些说法，大部分我都不相信，但那天晚上我做了个有趣儿的梦：我们在台球桌上用三个球儿玩游戏——一个白的，一个绿的，一个灰的——这种游戏的名字叫"奶头儿"。怎么把球儿弄到袋子里去，是有门道的。白球儿和绿球儿，很容易弄到袋子里去，但灰球儿，我就是弄不进去。

我醒了，这梦很容易解释：当然，这游戏的名字泄露了一些秘密：三个球儿代表三个女孩儿！那个白球儿，很容易猜出是什么，因为我偷偷地和一个有夫之妇出去，她当时在一家餐厅当出纳，穿一身白色的工作服。那个绿球儿，也很容易，因为我曾经有两个晚上和一个女孩儿到汽车电影场去看电影，她穿一身绿裙子。但那个灰球儿——那个灰球儿到底是什么玩意儿？我知道，它一定代表某人：我感觉得到。那就像你努力要记起一个名字，这名字就在你舌头尖儿上，可你就是想不起来。

我费了半天工夫，才想起我曾经对一个我非常喜欢的女孩儿说拜拜了，她在两三个月之前去了意大利。她是个很漂亮的女孩儿，我拿定主意，等她从意大利回来，我还去看她。我不知道她是不是穿一套灰色套

装，但我一想到她，事情就再清楚不过了，她就是那个灰的球儿。

我回到我朋友达伊弛那儿，我告诉他，他的看法一定是对的——分析梦，还是有道理可说的。但是，在他听完我这个有趣的梦的时候，他说："不是这样，这个梦太完美了——太整齐，太一般了。通常你需要进行更深入一些的分析。"

米特普拉斯特公司的首席化学家

我在麻省理工学院完成学业之后，想在暑假找个工作。我向"贝尔实验室"申请了两三次，还亲自去了好几趟。威廉·肖克利[8]，在麻省理工学院的实验室认识我，每次都带我到各处转悠，我每次都喜欢得不得了，但我就是不能在那里得到一份工作。

我的几位教授，为我向两个特别的公司写了推荐信。有一封信是写给"宝石蓝公司"（The Bauschand Lomb Company）的，这家公司使用透镜来追踪光线。另一家公司属于"纽约电器检验实验室"（Electrical Testing Labsin New York）。那年头儿，甚至没人知道物理学家是干什么的，工业界也没有物理学家的位置。工程师，敢情好；但是，物理学家，没人知道怎么用他们。有意思的是，很快的，在第二次世界大战之后，事儿就刚好反过来了：物理学家，哪儿都用得着。因此，在大萧条那年月，作为一个物理学家，我连个工作都难找。

大约是在那个时候，在我们家乡法洛克维（Far Rockway）的海滩上，我遇到了我的一个老朋友，我们是从小一块儿长大的。七八岁的时候，我们结伴儿上学，是很好的朋友。我们都有科学头脑。他有个"实验室"，我也有个"实验室"。我们经常一块儿玩儿，一块儿讨论事儿。

我们常常为街道上的孩子搞些魔术表演——化学魔术。我的朋友是个很好的街头艺人，我也是。我们在一张小桌子上玩儿把戏，桌子两头儿，还一直点着本生灯。把放了碘的两个玻璃皿，放在灯上加热。在表演过程中，桌子两头儿，两股儿漂亮的紫色蒸气冉冉升腾。这很棒！我们变了许多戏法，比方说，"葡萄酒"变水，以及其他一些化学颜色的变化。作为压轴戏，我们用我们自己发现的某种东西来变戏法。我把我的手（秘密地）放在一个水槽里，然后再放在汽油里，然后，我"不小心"扫过一只本生灯，那只手就着起火来。我鼓掌，结果两只手都着了。（手是烧不坏的，因为火着得很快，况且手上的水能隔热。）然后，我挥动着双手，一边跑，一边叫："起火了！起火了！"大家欢呼雀跃，跑出屋子，表演就结束了！

后来，我在大学把这个故事告诉兄弟会的哥们儿的时候，他们说："胡说八道！你做不到的！"

（为这些伙计展示他们不相信的事情，我常有这种麻烦——就说那次吧，我们争论尿是不是依靠重力排出体外的。我向他们展示事情不是

那样的，我让他们看，你打倒立，也还是能撒尿。或者说另外一次，有个人声称，如果你把阿司匹林和可口可乐一块儿咽下去，你立刻就会昏倒在地，不省人事。我告诉他们，我认为这纯粹是胡扯，自告奋勇愿意把阿司匹林和可口可乐咽下去。然后，他们展开争论，你是应该先吃阿司匹林，后喝可口可乐，还是先喝可口可乐，后吃阿司匹林，还是把阿司匹林混在可口可乐里面。因此，我先后以这三种不同方式，吃了六片阿司匹林，喝了三瓶可口可乐。首先，我吃了两片阿司匹林，喝了一瓶可口可乐；然后，我们把两片阿司匹林溶解在一瓶可口可乐里，我喝了；接着，我喝了一瓶可口可乐，再吃两片阿司匹林。每一次，那些相信这很危险的白痴们，都围着我站着，等着在我晕倒的时候，好扶住我。什么事儿也没有。我倒记得，那天晚上我睡得不好，于是我就起来，做了许多光学玻璃冷加工的活儿，还推导出了几个和所谓黎曼zeta函数的那玩意儿有关的公式。）

“得，伙计们，”我说，“大家出去找点儿汽油来。”

他们把汽油准备好了，我把手放在水槽里，然后放在汽油里，然后点火……疼得要命！你知道，那时我手背上长出了汗毛，这汗毛就跟灯芯儿似的，起火的时候，把汽油固定在皮肤表面，我在小时候玩儿这一套的时候，我手背上没有汗毛啊。为兄弟会的哥们儿做了这个试验之后，我手背上就一毛不剩了。

哦，对了，我朋友和我在海滩上碰了面，他告诉我，他搞了一种给塑料电镀的处理方法。我说，那不可能，因为没有导电性啊；你把电线系在哪儿啊。但他说，他能给任何东西电镀，我仍然记得他从沙里捡起一个桃核儿，说他也能给这个东西电镀——为了打动我。

他让我在他的小公司干活儿，太妙了。公司在纽约的一座建筑物的顶层。公司里大约只有四个人。搜罗钱的是他爸爸，我想他也是公司“总裁”。他是“副总裁”，还有另一个伙计，管推销。我是“首席化学家”，我朋友的兄弟，不大聪明，洗瓶子。我们有六个电镀槽。

他们真能给塑料电镀，过程是这样的：首先，在待镀物上沉淀上银，银来自加了还原剂的硝酸银溶液池（好像制造镜子）；然后，把带着作为导体的银的待镀物，放在电镀槽里，银就得到了电镀。

麻烦是：银能粘在被镀物上吗？

不能。银很容易剥落。因此，这中间有一个步骤，以便让银结结实实粘在待镀物上。这要看镀的是什么材料。像胶木这种东西（那年头儿，这是一种很重要的塑料），我朋友发现，如果先给它喷沙，然后放在氢氧化亚锡溶液里浸泡若干小时，氢氧化亚锡就会钻到胶木的微孔儿里，银就会牢牢地附着在胶木的表面上。

但这方法只对几种塑料管用，新型塑料层出不穷，比方说甲基丙烯酸甲酯（现在叫树脂玻璃），开始时是不能直接电镀的。醋酸纤维素，

很便宜，是另外一种我们起先不能电镀的东西。最后，我们发现，把它放在氢氧化钠溶液里泡一会儿，然后用氯化亚锡溶液一泡，就能把它镀得相当好。

作为“化学家”，我在公司里颇为成功。我的长项，在于我的伙计对化学一窍不通。他不做什么实验，他只知其然，而不知所以然。我大动干戈，把一大堆门把手放在一些瓶子里，然后在瓶子里加上各种各样的化学物质。什么东西都试，把每种东西都搞明白了，我就发现了许多方法，能镀许许多多种塑料，比他能镀的还多。

我还能简化处理过程。那是从书里看的，我试用了很多种还原剂，从葡萄糖到甲醛都试过了，结果能马上把银百分之百地置换出来，而不需要在事后从溶液里回收剩下的银。

我还通过在水里加一点儿盐酸，把氢氧化亚锡溶解在水里——我记得这是我在大学的化学课上学来的——这样，一个原本需要几个小时的步骤，大约5分钟就完成了。

我的那些实验，总受到那位推销员的干扰。他从潜在的客户那里带回一些塑料。我把全部的瓶子都摆好了，上面都贴了标签，突然之间，“别弄实验了，到销售部来做件‘高级的工作’！”就这样，许多实验都得重新做。

有一次，我们遇到了一大堆麻烦。有个艺术家，想为汽车杂志的封面制作照片。他非常小心地用塑料做了一只轮子，不知怎么的，这位推销员告诉他，我们什么都镀得来，这艺术家就想要我们把轮轴镀了，那样它就成了一个闪闪发亮的银轴子。车轮是用一种新塑料做的，我们不大知道怎么镀它——事实是这样：这位推销员从来不知道我们能镀什么，因此他总是大包大揽——结果第一次没镀成。于是，我们得把残留的银去掉啊，把银去掉可不容易。我决定用浓硝酸，一下子就把银去掉了，但也把塑料弄得坑坑洼洼。那会儿，我们可真的处于水深火热之中！实际上，我们做了许多“水深火热”的实验！

公司的另外那些伙计，决定在《现代塑料》杂志上做广告。好几种东西，我们镀得异常漂亮。在广告里看上去特棒。我们还在橱窗里摆了几样儿东西，指望潜在的客户能瞟上一眼，但没有人能从广告或者橱窗里把东西拿在手里，看看镀层粘得怎么样。事实上，有些东西，可能做得非常棒，但那是特别费心做出来的；别的产品没那么好。

那个夏末，我一离开公司到普林斯顿大学，他们就得到了一大笔订货，有个人想让他们镀塑料钢笔。现在大家都有银色的钢笔，闪闪发光，便于使用，外加便宜。这种钢笔立刻销售一空。看到大家别着这种钢笔满世界乱逛，而你知道这钢笔是哪儿来的，这事儿挺让人兴奋。

但公司对这种材料经验不足——也许是对塑料里的填料经验不足（大多数塑料不是纯的，里头有“填料”。在那年头儿，加多少填料，没

人管你）——这掺和进去的东西会发泡儿。你把个长泡泡的玩意儿拿在手里，它还开始脱皮儿，你就禁不住摆弄它。所以，大家都在摆弄从钢笔上搓下来的小皮皮儿。

现在公司有了修钢笔这种当务之急，我那哥们儿很肯定，他需要一架大显微镜什么的。他不知道怎么找到问题，不知道怎么会有这问题；要做这种假模假式的研究，还得花公司一大笔钱呢。结果他们麻烦大了：问题没解决，公司却给折腾倒了，因为他们出师不利，一开始就吃了败仗。

几年后，我在洛斯阿拉莫斯（Los Alamos）[9]，那里有个叫弗里德里克·德·哈夫曼（Fredericde Hoff-man）的，也算是个科学家吧，对经营，他很在行。书念得不多，却爱数学，干活儿很卖力气；他靠苦干，来补足书念得不多。后来，他成了“通用原子公司”（General Atomics）总裁或者副总裁，从此就成了个企业大腕儿。可人在当初，他不过是个精力非常充沛、闪乎着大眼、满腔热情的小伙子，尽其所能为项目打打帮手而已。

有一天，我们在富勒洛奇（Fuller Lodge）[10]吃饭的时候，他告诉我，在来洛斯阿拉莫斯之前，他一直在英格兰工作。

“你在那儿做什么？”我问。

“我在一家塑料电镀厂工作。我和几个家伙在实验室里。”

“搞得怎么样？”

“相当不错，但我们也有麻烦。”

“哦？”

“正当我们要把厂子做大的时候，纽约的一家公司……”

“纽约的什么公司？”

“叫作米特普拉斯特公司。他们比我们抢先了一步。”

“你怎么知道的？”

“他们不停地在《现代塑料》上做整版的广告，把他们能镀的东西，都拿来炫耀。我们意识到，他们比我们走得快。”

“你有他们做的活儿吗？”

“没有，但从广告上你看得出来，他们在我们的前头。我们厂不赖，但要和美国那家厂子较量，门儿都没有。”

“你们实验室里有几个弄化学的？”

“有六个弄化学的在干。”

“你觉得米特普拉斯特公司有几个弄化学的？”

“啊！他们一定有个真正的化学系！”

“你能给我说说，米特普拉斯特公司的首席化学家，可能是个什么样子，以及他的实验室是怎么工作的？”

“我猜啊，他们一定有25到50个搞化学的，首席化学家有自己的办公室——特别是，他戴眼镜，跟电影里的似的——那些家伙，总是进来问些关于正在进行的项目中的问题，从他那里得到建议，然后冲出去再做进一步的研究，那些人总是里出外进的。人家有25到50个搞化学的，我们怎么能跟人家较劲啊？”

“你要是知道，你正在和米特普拉斯特公司的首席化学家交谈，会觉得很有趣吧，他手下只有一个洗瓶子的！”

第2部分　在普林斯顿大学的岁月

“别逗了，费曼先生！”

我在麻省理工学院那阵子，真是喜欢它。我觉得那是个了不起的地方。我当然也想在那儿读研究生。可我去看了斯莱特（Slater）教授，把我的想法跟他说了，他说，“我们可不想把你留这儿。”

我说：“什么？”

斯莱特问：“你为什么认为你应该在麻省理工学院读研究生？”

“因为，论科学，麻省理工学院的研究生院全国最棒。”

“你是这么认为的？”

“是啊。”

“那就是你为什么应该另外找个学校的原因。你应该去发现这世界别的地方怎么样。”

我于是决定去普林斯顿大学。普林斯顿大学有高雅的一面。它部分的是仿效英国的学校。兄弟会那帮家伙，都知道我举止不雅驯，一副随随便便的样子，就开始发表评论了，说：“让他们瞧好吧，他们让谁到了普林斯顿大学！让他们瞧瞧自己犯的错误！”因此，我到普林斯顿大学的时候，就尽量乖一点儿。

我父亲开车把我送到了普林斯顿大学，我找到了自己的房间，他就走了。还不到一小时，我就遇到了一个人：“鄙人乃本舍主事，请容禀告，院长午后专设茶会，希望各位光临。或许您可以通知您的室友瑟瑞特先生。”

我就这么进了普林斯顿大学的研究生“院”，全体学生都住这儿。这好像是模仿牛津或者剑桥——连说话都是英国味儿（这位主事是个“法国文学”教授）。楼下有位门房，各人的房间都挺雅致。我们还穿着学位服，在装了彩绘玻璃窗的大餐厅里，一块儿吃饭。

就这样，到了普林斯顿大学的当天下午，我就赶赴院长的茶会，但我连“茶会”是什么玩意儿都不知道，再说，茶什么会啊！我什么社交能力都没有，对那路事儿，我没什么经验。

于是，我就走到那门口儿，院长艾森哈特（Eis-enhart）在那里向新生致意：“啊，您是费曼先生，”他说，“我们很高兴您来。”这多少让

我放松了些，不知道他怎么认得我。

我进了门，还有些女士呢，女孩儿也有。这整个都太正式了，我心里盘算着坐哪儿好，我该不该挨着这女孩儿坐，我举止应该如何，正在这时，我听见背后有个声音。

“您的茶，是加奶油，还是柠檬汁儿，费曼先生？”是艾森哈特夫人，在倒茶呢。

“两样儿都要吧，谢了啊。”我说着，还在张望着找坐的地方，其时我突然听到：“呵、呵、呵、呵、呵，别逗了，费曼先生！”

逗？逗什么逗？我没说过什么话呀？过后，我才意识到我干了什么。那就是我第一次参加茶会这玩意儿的经历了。

后来，那是我在普林斯顿大学待了很长时间之后的事儿，我才明白了这种“呵、呵、呵、呵、呵”是个什么意思。实际上，我是在离开那个首次茶会的时候，意识到了那意思是“你犯了个社交错误”。因为下次我从艾森哈特夫人那里听到同样的嘎嘎笑，“呵、呵、呵、呵、呵”，其时有个家伙在离开的时候，亲吻了她的手。

另外一次，大概是一年之后吧，在另外一次茶会上，我告诉魏尔德（Wildt）教授，有个天文学家，已经搞出了一个理论，来解释金星上的云彩。那些云彩被认为是甲醛（我们曾经对那些云彩很担忧，知道这一点儿，是很有意思的），现在，这个天文学家把这个搞明白了，甲醛是怎么形成的，诸如此类。这理论非常有意思。我们说着说着这事儿，一个小巧的夫人走过来，说，“费曼先生，艾森哈特夫人希望见见您。”

“好的，稍等……”我还在继续跟魏尔德聊。

小巧的夫人又来了，说：“费曼先生，艾森哈特夫人希望见见您。”

“好的，好的！”我走到艾森哈特夫人那儿，她正倒茶呢。

“您来点儿咖啡，还是茶，费曼先生？”

“那什么什么夫人说，你想跟我聊。”

“呵、呵、呵、呵、呵。您要来点儿咖啡还是茶，费曼先生？”

“茶，”我说，“谢谢。”

不多工夫，艾森哈特夫人的女儿和一个同学过来了，我们互相做了介绍。这种“呵、呵、呵”，整个意思是：艾森哈特夫人不想跟我聊；她女儿和朋友来了，她就想要我过去喝茶，两个女孩儿也好有个说话儿的啊。就这么个名堂。当时，我听到“呵、呵、呵、呵、呵”的时候，还知道怎么办。我没说，你“呵、呵、呵、呵、呵”，什么意思啊，你？我知

道“呵、呵、呵”意味着“错误”，我还是把这事儿弄清楚的好。

每天晚上我们都穿学位服去吃晚饭。第一天晚上，差点儿没把我魂儿吓掉了，因为我不喜欢场面。但我很快就发现，学位服有个好处。那些在外头打网球的家伙，冲进房间，抓起学位服就往身上套。他们不必费劲换衣服，或者冲个澡什么的。这么说，学位服下面，是光着膀子的、T恤衫什么的。除此之外，有规矩，你永远也不要洗学位服，因此你能分得清谁是一年级的，谁是二年级的，谁是三年级的，谁是猪！这个学位服，你用不着浆洗缝补，所以一年级的，学位服还是非常好看、相对干净的，可到了大约三年级那时候，这学位服就跟挂在你肩膀上的硬纸板儿似的，碎布条儿随风摆动着。

因此，我在普林斯顿上大学的时候，星期天下午穿学位服去喝茶，当天晚上到“院里”去。但是在星期一，我头一件想做的事儿，是去找回旋加速器。

在我还是普林斯顿大学的学生的时候，普林斯顿大学建造了一个新的回旋加速器，建得真叫漂亮！回旋加速器本身在一个房间里，控制台在另一个房间里。这工程，造得漂亮。通过管道，电线从控制间通到加速器上，控制台上满是按钮和仪表。我把这东西叫作镀金的回旋加速器。

那时我读了很多关于加速器实验的论文，麻省理工学院的人写得不多。也许他们才刚刚起步。但是好多实验结果，来自康奈尔大学（Cornell）和加利福尼亚大学伯克利分校（Berkeley）；最突出的，是普林斯顿大学。因此，我真想看到的东西，我一直在寻找的东西，就是普林斯顿的回旋加速器。那一定是一个了不起的东西！

因此，星期一的头一桩事儿，是我到了物理楼，问：“回旋加速器在哪儿——哪个楼？”

“楼下，地下室里——大厅尽头儿。”

在地下室？那是个老楼。地下室没足够的地方放回旋加速器啊。我走到大厅尽头，进了门儿，在10秒钟之内，我明白了为什么普林斯顿正是我该来的地方——我上学，这就是最好的去处了。这房间里，到处都拉着电线！开关在电线上吊着，冷却水从阀门上滴答着，满屋子都是东西。到处都是桌子，上面堆着工具，这是你看到过的最凌乱不堪的地方。整个加速器占了一个屋子，那可真叫一个乱啊。

这让我想起了我家里的实验室。麻省理工学院没有什么东西能让我想起家里的实验室。我突然意识到，为什么普林斯顿能出成果。他们是用这设备干活儿呢。他们建造的这设备；他们知道哪儿是哪儿，他们知道一切是怎么运作的，用不着麻烦工程师；有工程师的话，他也在那儿干活儿。它比麻省理工学院的那个回旋加速器小得多吗？它是“镀金的”吗？——恰恰相反，在他们想修理一个真空罐的时候，就在上面滴一

点儿甘酞树脂。因此地板上就滴着甘酞树脂。这很好啊！因为他们用这东西干活儿。他们不必坐在另一个房间里按按钮！（意外的是，他们那房间里起了火，因为他们把房间折腾得那个乱劲儿——电线太多——结果把回旋加速器给毁了。但我最好别讲这事儿！）

[我到康奈尔大学去看过那里的一台回旋加速器。这台加速器，还用不了一个房间来放：它差一点不到1米宽——我是说这东西整个的直径。这是世界上最小的加速器，但他们取得了令人瞠目的成绩。他们有各种各样的特别技巧和窍门。如果他们想修理“D”（粒子运行的D形环路）里面的什么东西，他们就动手用螺丝刀把D拆下来，修好了，再安上去。在普林斯顿，事情麻烦得多；在麻省理工学院，你必得用一架在天花板上滚动的起重机，把钩子垂下来，那真叫干活儿啊。]

从不同的学校，我学到了不少。麻省理工学院是个非常好的地方；我不会说它的坏话。我简直就是爱上了它。它为自己培养了一种精神，所以那整个地方的每一个人，都认为那是世界上最美妙的地方——它不知怎么就是美国的（即使不是世界的）科技发展中心。这好像纽约人对纽约的看法：他们把这国家的别的地方给忘了。如果你没有一种很好的全局感，那么你跟它相伴，身在其中，有动力和愿望与它一道前进，这感觉就是不错——你是上天特别选上的，能在那儿，是一种幸运。

这就是说，麻省理工学院是很好的，但斯莱特告诉我，到别的学校读研究生，是对的。我也经常给我的学生同样的建议。了解这世界的别的地方是个什么样子。这种多样性，值。

我曾经在普林斯顿的加速器实验室里做了一个实验，取得了令人震惊的结果。在一本流体力学的书里，有一个问题，学物理的学生一直在讨论。问题是这样的：你有一个S形的草坪喷水器——装在转轴上的一个S形管子——水以合适的角度向轴线方向喷，这就使它朝某一方向转动。人人都知道它是怎么转的；它向与水喷出的方向相反的方向倒退。现在问题是这样：如果你有一个湖，或者游泳池——水有的是——你把这个喷水器整个放在水下，却让它往里吸水，而不是往外喷水，它朝哪个方向转？它还是会像它在向空中喷水的时候那样转吗？或者它会朝相反的方向转？

乍看起来，答案是很清楚的。麻烦的是，有些家伙很清楚，答案是这个方向；另外一些家伙也很清楚，答案却是另一个方向。因此，大家都在讨论这问题。我记得，在一次特别的讨论会上，兴许是茶会，有人走到约翰·惠勒（John Wheeler）教授跟前，说：“您认为它朝哪个方向转？”

惠勒说：“昨天，费曼让我相信，它倒退着转。今天，他同样让我相信，它朝相反的方向转。我不知道明天他会让我相信它是怎么个转法儿！”

我将告诉你一个论点，让你认为它是朝某个方向走的；我再告诉你另一个论点，让你认为它是朝另一个方向走的。好吧？

第一个论点是这样：当你往里吸水的时候，你是往管子口儿里吸水，因此管子是迎着往里进的水往前走的。

可是，另外一个家伙，过来说，“假如我们把管子抓牢，并且问问，我们需要多大的转矩[11]才能把管子抓牢。如果水是往外喷的，我们大家都知道，你必须在曲线的外缘抓牢它，因为水流产生的离心力是绕着这条曲线走的。可现在，假定水以相反的方向绕着同一条曲线往里吸，它仍然产生朝这曲线外缘的相同的离心力。因此，这两种情况是一样的，喷水器将朝同一个方向转，无论你让它往外喷水，还是让它朝里吸水。”

我思考了一阵子，终于想清楚了答案是什么；为了演示这个答案，我想做个实验。

在普林斯顿的加速器实验室里，他们有一个用藤罩保护的大玻璃瓶子。我觉得这东西刚好可以用来做实验。我弄了一段黄铜管儿，把它弯成S形。然后，我在它中间钻了一个孔儿，塞进一段橡皮管儿，让这橡皮管儿从我塞在那个大玻璃瓶子口儿上的软木塞中间穿过。软木塞上还有一个孔儿，我把另一段橡皮管儿插在这个孔儿里，把它接到实验室的空压机上。往这大瓶子里吹气，我可以强迫水进入黄铜管儿，正像我用嘴把水吸出来似的。现在，S形管儿是不会转的，但它会扭动（因为橡皮管儿软塌塌的），然后我会通过测量水流从大玻璃瓶子口儿上射得多远，来测量水流的速度。

我把设备都安装好了，把空压机打开，“噗”的一声！气压把软木塞顶出了瓶子。我用铁丝把它好好绑在瓶口儿上，这样它就不会绷出来了。现在，这实验进行得相当好。水正在出来，橡皮软管儿扭动个不亦乐乎，于是我又增加了一点儿压力，因为速度快一点儿，测量会更准。我仔细地测量了角度，测量了距离，然后又增加压力。突然，这整个东西把瓶子压碎了，玻璃片儿和水在实验室里四下飞散。一个过来看热闹的家伙，淋成了个落汤鸡，不得不回家换衣服去（玻璃片儿没伤着他，倒是个奇迹）。用加速器耐心拍摄的大量云室照片，也淋得一塌糊涂。但我当时不知怎么站得足够远，或者站得位置凑巧，我倒没淋得太厉害。但我一辈子也不会忘记，负责加速器的德尔·萨索（Del Sassor）教授，是怎么走到我面前的，他声色俱厉地说：“新生的实验，应该在新生实验室做啊！”

我——！

在普林斯顿大学研究生院，每星期三，各路神仙都来演讲。讲话的经常很有趣儿。讲话后的讨论，通常非常好玩儿。比方说，我们学校有个坚定反对天主教的家伙，他提前为那些准备向宗教人物提问的人提供

问题，把那些讲话的整得好惨。

另外一次，有人发表了一个关于诗歌的演讲。他讲了一首诗的结构，以及这诗所附带的感情。他把什么东西都分门别类。在其后的讨论中，他说：“艾森哈特博士，这和数学中的情形，是否相同呢？”

艾森哈特博士是研究生院的院长，一个大数学教授。他也非常聪明。他说：“我倒愿意知道，迪克·费曼怎么看这个问题和理论物理学之间的关系。”他经常把我置于这种境地中。

我站起来说：“是的，关系非常紧密。在理论物理学中，相当于词语的那个东西，就是数学公式。诗歌结构，相当于理论的这个这个和那个那个之间的相互关系”——我滔滔不绝地讲了一大通，做了一个完美的类比。演讲者听得眼睛发亮，好不得意。

然后，我说：“在我看来，好像是这样：关于诗歌，随便你说什么，我都能找到个法子，把它和任何学科相提并论，正如刚才我把它和理论物理学相提并论一样。我并不认为这种类比有什么意思！”

在那个装了彩绘玻璃窗的大餐厅里，就是我们总在那儿穿着越发破烂不堪的学位服吃饭的那个，艾森哈特院长在开饭之前，总用拉丁语祷告。饭后，他经常站起来宣布几件事儿。有一天晚上，艾森哈特博士站起来说：“从现在起两个星期后，一位心理学教授，要来这里发表一个关于催眠术的演讲。这个这个，这位教授认为，如果我们真的演示一下催眠术，要比光说不练，强得多。因此，他希望有人自告奋勇，接受催眠术……”

我心花怒放：这不成问题，我一直想了解催眠术。机会难得！

艾森哈特院长接着说，如果有三四个志愿者，那就好了。这位催眠师就能先试试他们，看谁能够被催眠，因此，他竭力敦促我们能够提供这么多的人选。（他总是这么浪费时间，我的个老天爷！）

艾森哈特坐在大厅那边儿，我呢，总坐在另一边儿靠后的地方。那里有好几百个家伙。我知道，人人都会争先恐后担当此任。因为我远远地坐在后头，他看不到我，我急得要上树。在这次演示当中，我必须当仁不让！

最后，艾森哈特说：“我愿意问问各位，有没有自告奋勇的……”

我举着手，在座位上高喊，尽我所能叫得山响，我得保证他能听到我：“我——！”

他听得见，因为没有别的学生响应。我的声音在大厅里回荡——好尴尬啊。艾森哈特立刻答话：“好的，当然，我就知道你会当仁不让，费曼先生。但是，我倒想知道，还有别人吗？”

最后，另外几个家伙也报了名儿。一个星期以后，那人来这里拿我们做试验，看看我们几个当中，有没有适合于催眠术的。催眠术这东西，我知道；但给人家催了眠，是个什么感觉，我不知道。

他开始拿我操作，我一进入位置，他就说：“你没办法把眼睁开。”

我心里对自己说：“我敢打赌，我能把眼睁开，但我不想毁了这阵势：让我见识一下，他还能搞出什么名堂来。”这境况蛮有趣儿：你仅仅有那么一丁点儿迷糊，尽管你有那么一点儿失去控制，你还是很能拿得准，你是能把眼睁开的。但是，你就是不睁眼，从某种意义上说，你也就当然睁不开眼了。

他折腾了好一阵子，很有把握我是个很不错的人选。

当真正的演示来临的时候，他让我们走到台上来，当着普林斯顿大学研究生院全体师生的面，给我们实施催眠术。这次，效果强烈些；我猜我已经学会了怎么被催眠。这位催眠师搞的演示五花八门，让我做一些我通常做不来的事儿。到末了，他说，在我从催眠状态苏醒过来之后，我不是径直回到我的座位上（径直回去，本是当然的），而是在这房子里绕来绕去，从后面走回我的座位。

在整个演示过程中，我模模糊糊地意识到正在捣鼓的是什么，也照催眠师的吩咐，干这干那；但这一次，我拿定了主意：“去他的，够了够了！我就是要径直找座儿去。”

起身下台的时候到了，我开始直截了当地往我座位上走。可是，我有了一种气恼的感觉：我不能继续那样走了，这感觉太不舒服。我呢，在大厅里绕开了圈子。

在那之后，有一次，我被一个女人催了眠。在我进入催眠状态时，她说：“我要划一根火柴，吹灭它，然后马上放在你手背上，而你一点儿也不会觉得疼。”

我想：“扯淡！”她拿出一根儿火柴，划着，吹灭，放在我手背上。我觉得有点儿热乎乎的。在这过程中，我眼一直闭着，但我在想：“那容易。她划一根儿火柴，放在我手背上的却是另一根儿。偷梁换柱罢了，装神弄鬼呗！”

在我从催眠状态醒来的时候，我看看了手背，结果大吃一惊：我手背上有烧伤。很快起了一个水泡儿，可一点儿不疼，连破了的时候也不疼。

我因此发现催眠是一种非常有趣儿的体验。你一直在对自己说：“我能做那件事儿，但我不想做”——换句话说，你做不到。

猫地图？

在普林斯顿大学研究生院的餐厅里，人人都有自己的圈子。我和学物理的闲坐，但过了一阵子，我想：去看看这世界上别的地方搞些什么名堂，或许好玩儿吧。于是，我每一两个星期，就去别的圈子坐坐。

我和学哲学的坐一块儿的时候，我听他们相当严肃地讨论一本书，叫《过程与现实》（Processand Re-ality），怀特海[12]写的。他们的措辞，好玩儿，我听不大明白他们说的是什么。我现在不想打搅人家的谈话，不想没完没了地要求人家解释这个解释那个。倒有几次，我要他们解释，他们也乐意为我解释，可我还是摸不着头脑。最后，他们请我参加他们的讨论会。

他们的讨论会，像是上课。每周聚会一次，讨论几章《过程与现实》——某个家伙先发表一个关于这书的报告，接着是讨论。我来参加这个讨论会，对自己下了保证，把嘴闭上，时时提醒自己对这个学科一无所知；我到那儿，只是看景儿而已。

那儿发生的事儿，够典型的——典型到难以置信，却是真的。首先，我坐在那儿，一言不发，这就难以置信，但也是真的。一个学生做了个报告，说的是那周要讨论的那章书。在书里，怀特海不停地使用“本质对象”（essentialobject）这词儿，使用的方式很技术化，他想必是对这个词儿定义过，但我听不懂。

在讨论了一阵子之后，关于“本质对象”是个什么意思，主持讨论会的教授说了些什么话，意在澄清一些东西，还在黑板上画了一种像是闪电的玩意儿。“费曼先生，”他说，“你说，电子是‘本质对象’吗？”

哦，我麻烦来了。我承认，我没读过这书；怀特海用这个短语是个什么意思，我一点儿不明白。我到这儿来，仅仅是看看热闹。“但是，”我说，“如果教授先回答我的一个问题，我将努力回答教授的问题。砖头是本质对象吗？”

我想做的，是想发现他们认不认为理论构想是本质对象。电子是一种我们使用的理论；在理解自然运行的方式上，它太有用了，我们几乎可以说它是真实的。通过类比，我想把关于理论的一个看法讲清楚。说到砖头，我下一个问题将是：“砖头的里面是怎么样的？”——我将指出，没有人曾经看到过砖头里面是怎么样的。你每次把砖头打碎，你只能看到表面。砖头有一个里面，仅仅是一个理论，这个理论帮助我们理解事物理解得好一点儿。关于电子的理论，是类比性质的。因此，开始的时候，我问：“砖头是本质对象吗？”

几个回答于是就出来了。有个人站起来说：“一块儿砖头，作为一块儿个别的、特殊的砖头，那就是怀特海说的本质对象的意思。”

另一个人说："不对啊，一块儿个别的砖头，可不是本质对象；所有砖头共同具有的那种一般特性——即它们的'砖性'——才是本质对象。"

又有一个家伙站起来说，"不，'本质对象'不在砖头自身。'本质对象'，意思是心灵里的一个观念；当你思考砖头的时候，你就有这个观念。"

又一个家伙站起来，又是另外一个。我告诉你，看一块儿砖头，竟然有这么多别出心裁的不同方式，我以前可是闻所未闻。而且，正如在那些关于哲学家的故事里讲的那样，这讨论会在完全的混乱中结束。在他们以前的全部讨论中，他们甚至不曾问过自己，像砖头这么简单的对象，像电子这么更简单的对象，是不是"本质对象"。

在那之后，在晚饭时间，我就去了生物学那桌转悠。我一直对生物学有些兴趣，那些家伙谈的是很有意思的事情。他们中有几位邀请我来听听他们的细胞生理学。对生物学，我略知一二，但这是个研究生的课。"你认为我招架得住吗？教授让我进去吗？"我问。

我们问过那位讲师，牛顿·哈维（H.Newton Harvey），这人做了许多关于发光细菌的研究。哈维说，我可以参加这个特别的、高等的课程，但有一样儿——我要做全部的作业，要交书面报告，与别人一视同仁。

还没上第一节课之前，那些请我来上课的家伙，想给我看看显微镜下面的什么东西。他们在那里放了一些植物细胞，你可以看到一些小小的绿点子，那叫叶绿体（阳光照在上面，它就制造糖），在那里兜圈子。我看了看，抬起头问："它是怎么兜圈子的？什么玩意儿推着它转？"

没人知道。后来我知道，在那个时候，这种兜圈子还没有被大家理解。因此，我立刻就发现了生物学的一件事儿：很容易发现一个非常有意思的问题，却没人知道它的答案。在物理学那里，你一定要走得深入一点儿，你才能发现一个大家都不知道的有意思的问题。

开课了，哈维开始在黑板上画了一幅很棒的大画儿，画的是细胞，为细胞里面的全部东西都加了标签。然后他就开始讲这些东西，他讲的，大部分我都能懂。

画儿讲完了，那个请我来上课的家伙说："喂，怎么样？"

"还行，"我说。"我唯一不明白的，是卵磷脂的那一部分。什么是卵磷脂？"

这家伙就开始用那种单调乏味的声音解释："所有有生命的东西，植物和动物都一样，都是由跟小砖头似的东西构成的，那叫'细胞'……"

“听着，”不耐烦了我，“那个，我知道；否则我不来上这课了。什么是卵磷脂？”

“我不知道。”

我必须和别人一样递交书面报告，布置给我的第一个报告，是关于作用于细胞上的压力效果——哈维给我选了这么个题目，是因为它和物理学有关。尽管我理解我做的事情，但我在读报告的时候，把术语都念错了。在我谈论“分裂蛋儿”而不是“分裂球儿”以及别的诸如此类的东西的时候，全班总是笑得前仰后合。

给我选的第二篇文章，是亚德里安[13]和布朗克[14]写的。他们表明，神经脉冲是一种尖锐的单脉冲现象。他们曾经拿猫做过试验，测量过神经上的电压。

我开始读这论文。这文章老是谈伸肌、屈肌、腓肠肌之类的东西。这块儿肌肉，那块儿肌肉，都是有名字的，但这些肌肉在神经的什么位置上，或者在猫的哪块儿，我整个是一头雾水。于是我就去找生物学院的图书馆员，问她能不能给我找一张猫地图。

“猫地图，先生？”她相当恐怖地问我，“您的意思是，一张动物园的导游图！”从此以后，就起了传言，说是有个学生物的傻瓜学生，在找一张“猫地图”。

到我讲这个题目的时候，我开始画了一幅猫的轮廓，把猫的许多肌肉都标上名字。

班上别的学生打断了我，“那些东西我们都知道！”

“哦，”我说，“你们知道？怪不得我能这么快就赶上你们这些学了4年生物的。”15分钟能找得到的东西，他们却把时间都浪费在死记硬背这种东西上。

第二次世界大战之后，每个夏天我都可以开车到美国的什么地方旅游。有一年，在我到了加利福尼亚工学院以后，我想，“这个夏天，我不再到个不同的地方了，我要到一个不同的领域。”

那时正是华生和克里克[15]发现DNA双螺旋结构之后不久。加州工学院有一些很棒的生物学家，因为德尔布鲁克[16]的实验室就在那儿，华生也来加州工学院做DNA密码系统的讲座。我听了他的讲座，也参加了生物系的讨论会，热情十足。那是生物学领域非常令人振奋的时代。待在加州工学院，真是妙啊。

我不认为我会真的做一些生物学的研究，因此，我在夏天去访问生物学领域的时候，我不过是在生物学实验室里磨蹭，“洗洗盘子”而已，顺便也看看他们在搞些什么。我去了生物学实验室，把我这想法告诉了

他们。鲍勃·埃德加（Robert Edgar），一个年轻的博士后，在那里负点儿什么责任，说他不会让我这么干。他说，“你必得真的做点儿研究才成，像研究生那样，我们就给你一个问题，让你干。”正中下怀。

我听了一门抗生素的课，告诉我们怎么怎么进行抗生素的研究（抗生素是一种病毒，它有DNA，攻击细菌）。我立刻发现，我免除了不少麻烦，因为我懂一些物理学和数学。我知道原子在液体里是怎么个德行，因此离心机是怎么工作的，就没有什么神秘的了。我知道的统计学，足够让我在数培养皿上的小点点儿的时候，理解统计学上的偏差。正当生物学的家伙们在费劲理解这些“新”事物的时候，我可以把时间用于学习生物学的部分。

有一个有用的试验技巧，是我从那个课上学会的，今天我仍然用得上。他们教给我们怎么用一只手拿试管，还得把试管帽取下来（用中指和食指），把另一只手腾出来干别的（比方说用吸管来吸氰化物）。现在，我能用一只手拿牙刷，而用另一只手拿牙膏，把帽儿扭下来，扭上去。

已经发现，抗生素能够发生突变，这种突变能够影响它们对细菌的攻击力，我们的任务是研究那些突变。还有一些抗生素，会发生二次突变，能使它们重新组织起对细菌的攻击力。有些抗生素突变回去了，跟它们以前一模一样。另外一些不是这样：它们对细菌的作用，有一点儿轻微的改变——它们的行动，会比通常的快些或者慢些，细菌也比通常生长得慢些或者快些。换句话说，存在一些“后转突变”，但这些突变并不总是完美的；有时抗生素仅仅会部分地恢复了它们失去的能力。

鲍勃·埃德加建议我做一个试验，发现这种后转突变，是否发生在DNA螺旋体的同一个地方。小心翼翼，加上大量单调的工作，我发现了后转突变的三个例子，发生的地方非常靠近——比目前他们看到的任何东西都更靠近——这三个突变也使抗生素的作用能力得到部分的恢复。这工作做得很慢，这好像是守株待兔：你不得不等啊等啊，直等到你遇到个很稀奇的二次突变。

我一直在想方设法如何让抗生素更经常地突变，如何更快地侦察到突变；但是，我还没赶上掌握一种好技术，夏天完了，而我也不想继续研究这问题了。

可是，我的休假年[17]来了，因此我打算继续在这个生物学实验室工作，但研究另外一个题目。我和马特·梅瑟尔森（Matt Meselson）工作了一阵子，然后从英国来了个挺不错的伙计，叫史密斯（J.D.Smith）。这课题和核糖体[18]有关。核糖体是细胞里的“机器”，它用我们现在叫作信使RNA的那种东西来制造蛋白质。用放射性物质，我们可以证明RNA能够从核糖体中出来，也能回去。

我小心翼翼地测量和控制一切，但花费了我8个月的时间，我才意

识到有一个步骤做得毛糙了。在准备细菌的时候，要把核糖体从细菌里弄出去，在那年头儿细菌是依附在氧化铝上在研钵里研磨的。除了研钵，别的东西都是化学的，都在控制之下；但是，在你研磨细菌的时候，你无论如何也不可能两次完全重复研杵的动作。因此，这种试验弄不出什么结果。

我想我一定要讲讲那次我和希尔迪噶德·兰姆弗罗姆（Hildegarde Lamfrom），想发现豌豆是不是也和细菌一样能利用核糖体。问题是：细菌的核糖体，是否可以制造人类或者其他生物体的蛋白质。她刚刚搞出了一个方法，能从豌豆中提取出核糖体，并且给豌豆核糖体信使RNA，这样豌豆核糖体就会制造豌豆的蛋白质。我们意识到了一个非常具有戏剧性和重要性的问题，即如果我们把豌豆的信使RNA给细菌的核糖体，那么这个细菌的核糖体会制造豌豆蛋白质还是细菌蛋白质。那将是一个非常具有戏剧性和根本性的实验。

希尔迪噶德说："我需要大量细菌核糖体。"

梅瑟尔森和我从大肠杆菌提取了大量核糖体，好用来做其他实验。我说："该死，我会把我们弄到的核糖体给你的。我们有的是，在我实验室的冰箱里。"

如果我是一个很棒的生物学家，那将会是一个令人叫绝的大发现。但我不是个很棒的生物学家。我们想法很棒，实验很棒，设备合用，但我把事情弄得一团糟：我给她的是被感染了的核糖体——在那种实验中，那是你可能犯的最低级的错误。我的核糖体在冰箱里放了差不多一个月，被某种别的生物体污染了。假如我重新赶紧准备好核糖体，交给她的时候，当心点儿、小心点儿，把什么事情都控制好，那个实验是会有结果的，我们也会第一个发现生命一致性（uni-formity）：制造蛋白质的机器，即核糖体，在每个生物中都是相同的。我们站的位置没错儿，我们做的事儿没错儿，但是我做事儿像个外行——愚蠢不堪、邋里邋遢。

你知道这让我想起了什么事儿？福楼拜书里的包法利夫人的老公，一个蠢笨的乡村郎中，冒出个念头，要给人家治歪脚，他的搞法不过是拿着大伙儿穷折腾。我和这位缺乏训练的医生，差不多。

和抗生素有关的另外一个工作，我从来也没写下来——埃德加一直要求我写下来，可我就是没腾出工夫考虑。你不在自己的领域里，就有这毛病：你不把它当回事儿。

我倒也马马虎虎地写了个东西。我把它寄给了埃德加。他读的时候，笑得喷茶。那东西没按照生物学家的套路来写——首先是，程序，如此等等。我花费了大量时间来解释所有生物学家都知道的事情。埃德加搞了个缩写本，我却看不懂了。我想他们没把它发表。我可从来没直接那样发表。

华生认为我用抗生素搞的那些东西，有点儿意思，所以他邀请我到了哈佛。我给生物系讲了个话，谈的是二次突变发生得那么靠近。我告诉他们，我的猜测，是一个突变在蛋白质里造成了变化，比方说，改变了氨基酸的p H值，而另外一个突变在同一个蛋白质分子里的氨基酸那里制造了一个相反的变化，因此它部分地平衡了第一个突变——平衡得不太完美，但足以使抗生素重新运作起来。我认为那是在同一个蛋白质分子里的两个变化，它们在化学上互相抵消了。

结果证明不是这么回事儿。几年后，毫无疑问，有人搞出了一种技术，能更快地制造突变和侦察到突变，他们发现，第一个突变是这样一个突变：其中的DNA碱基全部丢失了。这样，“密码”移位了，再也不能被“识别”。在第二个突变当中，或者是一个额外的碱基被放回去了，或者是又有两个碱基给弄出去了。现在，密码又能识别了。第二突变发生得离第一突变越近，被这种二次突变改变的信息就越少，抗生素一度失去的能力就恢复得越完全。每个氨基酸分子，要有三个“字母”来编码，这个事实于是昭然若揭。

我在哈佛的那个星期，华生提起了个什么事情，我们就一起做了几天的实验。那实验没做完，但我从世界上最棒的人那里，学到了一些新的实验技巧。

但那可是我了不得的时刻：我给哈佛的生物系上了一课！我总是这么干，一头扎在什么东西里，看看我能走得多远。

我学到了许多生物学的东西，得到了许多经验。生物学术语的发音发得准了一点儿，知道在论文里和讨论会上不能什么都说，还察觉到了实验里的一个技巧上的弱点。但我爱物理学，我愿意重新投身到物理学当中去。

魔鬼头脑

我在普林斯顿大学读研究生的时候，在约翰·惠勒手下做研究助手。他要我解决个问题，这问题难了，我毫无进展。因此，我想起了我早先在麻省理工学院就有的一个想法。这想法是：电子不对自己发生作用，只对其他电子发生作用。

有这么个问题：在你震动一个电子的时候，它就辐射出能量，于是它就失去了一点儿能量。这意味着一定有一个力作用于它。当这个电子带电荷的时候，和它不带电荷的时候，那个力必定是不同的。（如果电子在带电荷和不带电荷的时候，力是严格一样的，在一个情况中它失去能量，而在另一个情况中不失去能量。你对同一个问题，不能有两个不同的答案。）

标准理论是这样：电子依靠自己活动，这才产生了那个力（所谓辐射反应力），但我看到的是，电子只有依靠别的电子才活动。因此，当

时我意识到，我麻烦了。（我在麻省理工学院的时候，就有了这个想法，但没意识到这个问题；到我在普林斯顿的时候，我知道了这个问题。）

我想的东西是这样：我将震动这个电子。它将使附近的某个电子也震动，从附近某个电子返回来的效应，或许就是辐射反应力的来源吧。因此我做了一些计算，把结果送给了惠勒。

惠勒立刻就说，“呵，那不对，因为，你的意思是，它与其他电子之间的距离的平方成反比；然而，它完全不应该决定于这些变量中的任何变量。照你那么说，它还与其他电子的质量成反比呢；它还与其他电子的电荷成正比呢。”

让我闹心的是，我以为他想必一定做过这个计算。只是后来我才知道，像惠勒这样一个人，你一把那个问题给他，他一眼就能看明白所有的东西。我必得计算，可他看看就明白。

然后，他说，“它将会被延迟——波返回得晚——所以，你说的这些，不过是反射光而已。”

“哦！当然。”我说。

“可是，等一下，”他说，“让我们假定反射光是以超前波（及时返回来的反作用力）的方式返回来的，因此它就会立刻返回。我们已经知道，这种效应与距离的平方成反比；但是，假定有许多电子，都在空间当中：其数量与距离的平方成正比。因此，也许我们能够把它整个都抵消了。”

我们发现我们的确能那么做。结果非常好，正如所料。这是一种也许正确的经典理论，尽管它和麦克斯韦[19]或者洛伦兹[20]的标准理论不同。它没有电子自作用论的那种无限性的麻烦，它很巧妙。它有作用和延迟，有时间上的向前和退后——我们把它叫作“半超前与半延迟势位”。

惠勒和我想，下一个问题将转到关于电动力学的量子论上，这个理论（我想）和电子的自作用有麻烦。我们盘算着，如果我们能够先把经典物理学中的这个麻烦消除掉，然后从中搞出一个量子论，我们也能同样把量子论弄妥当。

既然我们已经把经典理论搞妥帖了，惠勒说，“费曼，你是个年轻的伙计——你应该为此开一个讨论会。在讲话方面，你需要经验的。我也会解决量子论的部分，晚些时候，我也开一个讨论会。”

那是我第一次发表专业讲话，惠勒和尤金·魏格纳[21]做了安排，把这个讨论会加在了例行的讨论会计划中。

在讲话前的一两天，我在餐厅里见到了魏格纳。“费曼，”他说，“我想你和惠勒的工作很有意思，因此我已经邀请了罗素来参加讨论会。”亨利·诺里斯·罗素[22]，当时著名的大天文学家，来参加讲座！

魏格纳继续说。“我想冯·诺伊曼教授，也有兴趣。”约翰·冯·诺伊曼[23]在哪儿都是最伟大的数学家。“另外，泡利[24]教授眼下从瑞士到这儿访问，事儿凑巧了，所以我也邀请了泡利教授过来”——泡利是一位非常有名的物理学家——到了这个时候，我脸都黄了。最后，魏格纳说：“只是爱因斯坦[25]教授难得光临我们每周一次的讨论会，但你的工作太有意思了，我也特别请了他，所以他也过来了。”

到了这个时候，我脸都绿了，因为魏格纳说：“别，别！别担心！但我只是想警告你：如果罗素教授睡着了——他肯定会睡着的——那不意味着这个讨论会很糟糕；他开什么讨论会都睡觉。另一方面，如果泡利教授不停地点头，好像从头到尾都对这个讨论会表示首肯似的，你也不必得意。泡利教授点头，是因为他有肌肉麻痹症。”

我回到惠勒教授那儿，一五一十地把这些有名的大人物数给他听，他们都来参加他让我弄的这个讲话，告诉他我六神无主了。

“没什么大不了的，”他说，“别担心。所有的问题，都由我来回答。”

于是我就准备着讲话，等那天来了的时候，我走进去，做了某种没有讲话经验的年轻人经常做的事儿——我在黑板上写了太多的方程式。你瞧，人年轻啊，话都不知道怎么说了：“当然，那个是反比，这个是这么搞的……”因为在座诸位都已经知道这些；他们一看就明白。但是，他却不明白。他实际上只能正儿八经地通过搞这些个代数计算来弄出结果——因此，就这么一片方程式。

正当我提前把这些方程式写得满黑板都是的时候，爱因斯坦进来了，兴味儿十足地说：“哈喽，我参加你们的讨论会来了。可首先，这茶在哪儿啊？”

我告诉他茶在哪儿，接着继续写方程式。

然后，讲话的时间到了，就在这里，这些魔鬼头脑就在我面前，等着呢！我的第一次技术性讲话，就有这么一帮子听众！我的意思是，他们会把我续到压汁机里！我记得很清楚，当他们从牛皮纸信封里把我的稿子拿出来的时候，我看到我的双手在哆嗦呢。

可是，有个奇迹发生了；在我一生中，这种奇迹一而再地发生。对我来说，太幸运了：从我开始思考物理学的那一刻起，我不得不把精神集中在我正在解释的东西上面，我脑子里什么杂念也没有了——我完全对神经兮兮产生了免疫力。因此，在我发动起来之后，我简直不知道在这屋子里的都是谁。我只是在解释这个想法，没别的。

但是，在讨论会的末尾，提问的时候到了。泡利，他挨着爱因斯坦坐着，立刻站起来说：“我银为这嘎理论不可能对，银为这噶、这噶，还有这噶，”他转向爱因斯坦说，“你同意吗，爱因斯坦教授？”

爱因斯坦说：“不——同——意！”和和气气的，德国味儿的“不同意”很礼貌的。“我只是发现，要为引力相互作用搞出一种相应的理论，会是很困难的。”他说的引力相互作用，意思是他的广义相对论，那是他的小宝宝。他继续说：“因为，到目前为止，我们还没有太多的实验证据，我对正确的引力理论，还没有绝对的把握。”爱因斯坦坦然承认，事情或许会和他的理论所说的不同；他对别的观念很宽容。

我希望我能记得泡利说了什么，因为，若干年后，我发现，当这个理论用来建立量子论的时候，它不能令人满意。可能是这样：这个大腕儿立刻就注意到了麻烦所在，接着就为我解释成问题的东西，但我不必回答问题，这使我大大松了一口气，以至于我没有仔细听他们说什么。我确实记得我和泡利一起走上了帕尔默图书馆（Palmer Library）的台阶，他对我说：“到惠勒演讲的时候，关于量子论，他会说些什么呢？”

我说：“我不知道。他没告诉我。他单打独斗。”

“哦？”他说，“这人干活儿却不告诉助手，他在为量子论搞些什么？”他走近一点儿，用低沉而神秘的声音说，“惠勒永远不会开那个讨论会的。”

他说准了。惠勒没开那个讨论会。他认为，把量子的部分搞出来，应该是容易的；他认为自己几乎把它搞出来了。但他没有。到讨论会该开了的时候，他意识到他不知道怎么弄了，因此没什么可说。

我也没解决这个问题——一种关于半超前与半延迟势位的量子论——我为此工作了好几年。

搅和油漆

为什么我说自己“没教养”或者“反知识分子”，其原因或许一直可以追溯到我上中学的时候。我一直担心自己女里女气，我不想让自己太娇气。在我看来，真正的男人不会在诗之类的东西上费心思。诗是怎么写成的——这个，从来没往我心里去！因此，我对那些研究“法国文学”的家伙，或者研究音乐和诗研究得过了分的家伙，起了一种消极的态度——那都是些“异想天开”的东西嘛。我更羡慕炼钢工人、焊工或者机修工。我总认为那些在机修厂里干活儿的，能造出东西来的家伙，他才是真正的家伙！那是我的态度。在我看来，做一个务实的人，不知怎么，总是一种正面的优点；“有教养”或者“知识分子”就不是了。前者是对的，当然对；但是，后者，都是些疯子。

我在普林斯顿读研究生时，还有这种感觉，等会儿你就会看到。我

常常在一家叫“爸爸的地方”的漂亮的小饭馆儿吃饭。有一天，我正在那儿吃着饭，一个油漆工穿着工装，从楼上他干活儿的房间里下来，在我近旁坐下来。不知怎么，我们就谈了起来。他开始聊干油漆这行儿，“你有好些东西要学。比方说，”他说，“在这个饭店里，要是你来干这个活儿，你用什么颜色漆墙面？”

我说我不知道，他就说：“你得在这么高的地方，留出深色的墙围子，因为，你瞧，守着桌子坐在那儿的那些人，胳膊肘擦着墙，所以你不想那里的墙面白白净净的。那儿太容易脏了。可从那儿往上，你确实希望它是白的，给人一种饭店里干净的感觉。”

这家伙似乎懂行，我坐在那儿，琢磨着他的话，他说，“你还得知道颜色的事儿——当你把油漆搅和起来的时候，怎么得到不同的颜色？比方说，要得到黄色的，你需要把什么不同颜色的油漆搅和起来？”

把不同颜色的油漆搅和起来，得到黄色的，这个我不知道。要说光的话，你把绿光和红光混起来就成，但我知道他说的是油漆。所以我说，“要是不用黄的，我不知道你怎么搞出黄的。”

“是这样，”他说，“你把红的和白的搅和一块儿，就是黄的。”

“拿得准你说的不是粉红的？”

“不是，”他说，“是黄的。”——我相信他会弄成黄的，因为他是个专业的油漆工，而我一贯佩服像他那样的家伙。但我还是纳闷他是怎么弄成的。

我有了个想法。“那一定是某种化学变化。你用过什么特别的能发生化学变化的色料吗？”

“没用过，”他说，“任何老式的色料都管用。你到杂货店去弄些油漆来——只要平常的一罐儿红油漆和平常的一罐儿白油漆——我会把它们搅和起来，我让你瞧瞧怎么得到黄油漆。”

到这节骨眼儿上，我就想了：“什么玩意儿发疯了。油漆，我知道得不少，知道弄不出黄的来，但他一定知道你一定会弄出黄的，因此有意思的事情来了。我一定得看个究竟！”于是我说：“得，我去弄油漆。”

油漆工上楼去了，好干完他的活儿。饭店老板过来对我说：“你憋着个什么心眼儿，要跟那人吵？那人是个油漆工；他干了一辈子的油漆工，他说他能弄成黄的。那你跟他吵吵个什么劲哪？”

我觉得尴尬了。我不知道说什么好，最后我说：“我一辈子，一直在研究光。我认为，用红的和白的，你弄不成黄的——你只能弄到粉红的。”

于是我去了杂货店，弄来了油漆，拿到饭店来。油漆工从楼上下来，饭店老板也凑过来。我把油漆罐儿放在一把旧椅子上，油漆工开始搅和油漆。他加一点儿红的，再加点儿白的——在我看来，还是粉红的——他又搅和了更多的。然后，他嘟嘟囔囔地说了这么一种意思，“我通常是加一小管儿黄油漆，为了把颜色提亮些——那样就会是黄的。”

“啊！”我说，“那当然！你加了黄的啊，所以你能搞成黄的；但是，没黄的，你就搞不来了。”

油漆工回到楼上，干活儿去了。

饭店老板说：“那小子真有胆子哈，敢跟一个研究了一辈子光的家伙吵吵！”

但是这件事儿，表明我是多么信任那些“真正的家伙”。那个油漆工跟我说了那么多，听来蛮有道理；我呢，很愿意逮着个机会看看我有所不知的一个怪现象。我指望看到的是粉红，但我的思想状态是：“这个只此一家的弄到黄油漆的办法，想必是个有意思的新鲜事儿，我必得看个究竟。”

我在我的物理学中，经常出错儿，那是因为我以为某个理论实际上不那么好，以为有许多复杂情况会毁了这个理论——什么事儿都可能发生，就是这么一种态度，尽管你很有把握什么事儿才是应该发生的。

别具一格的工具箱

普林斯顿的研究生院，物理系和数学系共用一个休息室，每天四点钟，我们都来喝茶。那是下午放松的一种方式，姑且不提这是模仿英国的大学。大家坐着下围棋，或者讨论定理。那时候，拓扑学闹得正欢。

我仍然记得有个家伙坐在沙发上，冥思苦想呢，另一个家伙站在他面前，说：“因此，这个这个是正确的。”

“为什么是那样？”沙发上的那家伙问。

“不足挂齿！不足挂齿！”站着的家伙说，奋笔疾书了一套逻辑推导步骤：“首先，你设如此这般，于是我们有基尔霍夫（Kirchhoff）的这个那个，然后有沃芬斯多弗（Waffenstoffer）定理，于是我们代入这个并建立那个。现在你把这个转动的矢量放在这儿，于是如此这般……”沙发上的那家伙苦苦挣扎着要理解所有这些东西，就这么折腾了差不多15分钟！

最后，站着的那家伙，从另一头儿推演了一遍，沙发上的那家伙说：“敢情，敢情。是不足挂齿啊！”

我们这些物理学家在笑，想猜出他们在搞什么名堂。我们断定“不足挂齿”意思是“已经得到了证明”。因此我们和数学家们开玩笑：“我们有了一个新定理——数学家只能证明那些不足挂齿的定理，因为每一个已经得到证明的定理都是不足挂齿的。”

数学家们不喜欢这个定理，而我就拿这个来逗他们。我说，没什么令人惊讶的——数学家只证明那些明摆着的事情。

对数学家而言，拓扑学完全不是明摆着的。有各种各样的奇异的可能性，是“反直觉的”。于是我有了一个念头。我向他们提出挑战：“我敢打赌，你连一个定理都说不出来——请用我能明白的措辞来说，你说的那些假定是什么，你说的那个定理是什么——而我却不能马上告诉你它是对的还是错的。”

事情经常弄成这样：他们想跟我解释什么，“你有了一个橘子，对吧？现在，你把这个橘子切成有限数量的许多块儿，你再把这些块儿摆回去凑在一起，它就跟太阳一样大。对还是错？”

“中间没空当儿？”

“没空当儿。”

“那就不可能了！纯粹异想天开嘛。”

“哈！我们可逮着他了！大伙儿都凑近来！那就是‘不可测量’定理啊！”

正当他们以为他们逮着我的时候，我提醒他们，“但是，你说的是橘子！你不可能把橘子片儿切得比原子还薄。”

“但是，我们有连续性这个前提条件啊：我们可以切个不停！”

“切不得的，你说的是橘子嘛，因此我还当你说的是真正的橘子呢。”

因此，赢家总是我。如果我猜对了，伟大。如果我猜错了，我也总能找到他们忽略了的简单化处理方法。

实际上，我的那些猜测，是有一定量的货真价实的东西的。我有个方法，我至今还在用，当有人跟我解释某个我想理解的东西的时候，我就不停地提出例子。比方说，数学家们将要把一个棒极了的定理弄出来了，大家都很兴奋。当他们告诉我这定理的条件时，我就构想出一个符合所有这些条件的什么玩意儿来。你知道，他们说一个集合的时候（我就想到一个球儿）——他们说两个不相交的集合的时候（我就想到两个球儿）。在他们提出更多的附加条件的时候，球儿就出来颜色了，就长毛了，就怎么怎么的了。最后，他们开始发布那个定理了，我说：“不对

啊！”因为这个定理不适用于我那个长毛的绿球儿。

如果是对的，他们就欢呼雀跃，我就让他们先高兴一阵子。然后呢，我就提出我的反例。

“哦，我们忘了告诉你，那是豪斯多夫第二类同态。”

“哦，那样的话，”我说，“它就不足挂齿！不足挂齿！”到那个时候，我知道了那是怎么回事，尽管我不知道豪斯多夫同态是个什么意思。

大多数时候，我猜得对；因为，尽管数学家们认为他们的拓扑学定理是反直觉的，但那些定理不像他们以为的那样难。对于这种超细致的切割营生的那些好玩儿的属性，你是会习惯的；它的结果会是怎么样的，你也能猜个八九不离十。

尽管我找了数学家许多麻烦，但他们对我还是很和气的。他们是一群在一起搞东西的男孩儿，而且对自己搞的玩意儿兴奋不已。如果你问他们个简单的问题，他们就会讨论起他们那些“不足挂齿”的定理，也总是想为你把那个什么东西解释清楚。

保罗·奥拉姆（Paul Olum）和我共用一个洗澡间。我们成了好朋友，他想教我数学。他教我“同伦群”，到那份儿上我就作罢了。但在那个水平之下的东西，我都学得相当好。

有一个东西，我怎么也没学会，就是路径积分法。我中学的老师贝德（Bader）先生给过我一本书，我从这书上学会了用各种不同方法来计算积分。

有一天下课后，他让我等一下儿。“费曼，”他说，“你话也太多了，聒噪个没完。我知道为什么。你觉得乏味。因此，我会给你一本书，你到后边那儿去，待在角落里，研究这书，等你把这书里的全部东西都吃透了，你就可以说话。”

因此，在每一堂物理课上，对帕斯卡定律是怎么个事情，或者无论他们在干什么，我一概漠不关心。我在后头捧着这本《高等微积分学》，伍德斯（Woods）写的。贝德知道我多少研究过《实干家的微积分》这本书，所以他把真正的著作给了我——那是大学低年级或高年级上课用的。里头有傅立叶级数、贝塞耳函数、行列式、椭圆函数——都是我不知道的一些好玩儿的东西。

这书也让我明白，怎么对积分符号内的参数求微分。后来我知道，大学里教这个东西教得不多；他们不重视这个。但我明白怎么用这个方法，而且我是翻来覆去地用这该死的方法。因此，因为我是自己学会了使用那本书，我也有自己独特的方法来解决积分问题。

结果是，麻省理工学院或者普林斯顿大学的那帮家伙在做某个积分题遇到了麻烦，那是因为他们不会用在中学学到的标准方法来解决问题。如果那应该用路径积分法，他们本该看得出来；如果那是一个简单的级数展开，他们本该看得出来。然后，我过来了，打算在积分符号内取微分，而这经常管用。因此，我做积分出了大名，这仅仅是因为我的工具箱跟别人的不同；他们在试过了自己的全部工具之后，把问题给了我。

测心术

我爸爸一直对魔术和狂欢节上演的那些把戏感兴趣，想知道那是怎么弄的。他知道的一件事，是测心术。在他还是小孩儿的时候，是在长岛（Long Is-land）中间的一个叫帕查崮（Patchogue）的小镇子上长大的。到处都是海报，说是下个星期三，有个测心术的要来。海报上说，几个有名望的市民——市长、一个法官，还有一个银行家——要把一张五块的票子藏在个什么地方。等那个测心术的一来，就能找到它。

他来的时候，大家都围拢过来，看他显本事。他一只手拉着法官，一只手拉着银行家，票子就是他俩藏的，开始沿着街道走下来。他到了一个十字路口，转过街角，走到了另一条街上，然后又走到另一条街上，进了该进的那个房子里。他是跟他俩一道儿走的，总拉着他俩的手，进了房子，上了二楼，进了那个该进的房间，走到一张办公桌前，撒开那两位的手，拉开该开的抽屉，五块的票子果然在那。神啊！

那年头儿，要受到好的教育，难了；因此，这个测心术士就被雇来当我爸爸的私塾先生。有一次下课的时候，我爸爸就问他，没人告诉他钱在哪儿，他是怎么把钱找到的。

测心术士是这么解释的：你拉着他们两人的手，松松垮垮地拉着，你走的时候，轻轻摇晃着。你到了个十字路口，你往哪儿去，往左，还是往右。你往左稍微那么一摇晃，如果不对，你能感觉出那么一点儿抵触，因为他们没想到你会去那边儿。但是，当你往正确的方向上走的时候，因为他们认为你或许真能知道该往那儿走，他们比较会顺水推舟，没什么抵触。因此，你必须总是稍微那么摇晃着点儿，试探着往哪边儿走看来最少抵触。

我爸爸把这故事讲给我听了，他说那还是需要不少的练习。他自己从来也没试过。

后来，我在普林斯顿大学读研究生，有个伙计名叫比尔·伍德沃德（Bill Woodward），我决定拿他来试试。我突然宣布我会测心术，能猜透他的心思。我告诉他到那个“实验室”里——一大间房子，里头有好几排桌子，桌子上满是各种各样的设备、电路、工具，到处都是垃圾——在什么地方，挑出一件什么东西，再出来。我跟他解释为什么让他

干这个，“现在我测你的心，把你带到那物件那儿”。

他进了实验室，记下了一个特别的东西，然后出来了。我拉着他的手，开始摇晃。我们走过这条走道，再走过另一条，果真就走到了那东西那儿。我们试了三次。其中有一次，我找到了那个东西——它混在一大堆东西中间。另一次，地方我是去对了，但错过那东西才几厘米——东西找错了。第三次，不知哪儿出毛病了。但是，总的说来，结果比我原来想的好。很容易的。

那次之后，当时我大约26岁左右，我爸爸和我去了亚特兰大市。那儿狂欢节在室外变戏法的，五花八门。我爸爸去办什么事儿了，我就去看一个玩儿测心术的。他坐在台子上，背对观众，穿着长袍，扎着穆斯林的那种大头巾。他有个助手，一个小个子家伙在观众中间跑来跑去，喊着类似这么一些话，“哦，大师，这个笔记本是什么颜色？”

“蓝色的！”大师说。

“啊，了不起啊先生，那么这位妇女叫什么名字啊？”

“玛丽！”

有个家伙站起来：“我叫什么名字？”

“亨利。”

我站起来说：“我叫什么名字？”

他没回答。那个家伙显然是个托儿，但我琢磨不透这个测心术士是怎么玩儿的另外一些把戏，像说出笔记本的颜色。他在大头巾下面戴着耳机吗？

在我和我爸爸见面的时候，我把这个告诉了他。他说：“他们设计了一些暗号，但我不知道是什么暗号。咱们回去看个究竟。”

我们回到了那个地方，我爸爸对我说：“这里是五毛钱，你到那边儿算命摊子上算算命吧，半个钟头以后见面。”

我知道他要干什么。他要去给那个人讲个故事，要是他儿子不在那儿不停地“嚯！嚯！”，那会顺利些。他不得不把我打发到一边儿去。

他回来的时候，把暗号整个告诉了我：“蓝色是‘哦，大师’，绿色是‘哦，无所不知的人’，如此等等。”他解释说，“我到了他那儿，后来呢，告诉他我以前在帕查卤摆摊儿卖艺，我们也有一套暗号，但算不了那么大的数，能说的颜色也没那么多，我问他，‘你怎么能记得住这么多东西啊？’”

这位测心术士对自己的暗号很是自豪，坐下来，把他的那一整套对

我爸爸一五一十地讲了个透彻。我爸爸就有这个本事，我可不行。

业余科学家

小时候我有一个“实验室”。我说那是个实验室，意思不是说我用它测定什么。我倒拿它来玩儿：我造了一台发电机，造了一个小机器，在什么东西走过光电池的时候，它能转起来。我还拿着硒到处玩儿：我一天到晚东游西荡。我为那个电灯排做了点儿计算，这个电灯排是一串开关儿和灯泡儿，我用来当作电阻，好控制电压。但那都是为了某种用处。我从来没做过实验室的那种实验。

我有一架显微镜，爱观察显微镜底下的东西。那是需要耐心的：我会把什么东西放在显微镜下，然后隔一阵子去看一次。跟别人一样，我看到过许多有意思的东西——一个硅藻慢慢地走过玻璃片儿，等等。

有一天我在观察一个草履虫，我看到了我学校里的课本上没讲到的东西——甚至大学的课本也没讲到。那些书总是把事情简化了，好让这个世界更像它们希望的那样：当那些书讲动物的行为时，开头儿总是这样，“草履虫极其简单；它的行为很简单。当它拖鞋似的在水里动起来的时候，它就转，直到它碰上个什么东西，那时它就蜷缩起来，转开一个角度，然后又开始动”。

这实际上是不对的。首先，人人都知道，草履虫有时互相交配——它们凑在一块儿，交换细胞核。它们怎么决定什么时候做这个？（没关系：那不是我观察到的东西。）

我观察到这些草履虫碰到个什么东西，蜷缩，转过一个角度，然后又走。说它是机械的，像个计算机程序，这想法不对——它看起来不是那样。它们走的距离不同，它们蜷缩的距离不同，它们在各种情况下转过的角度不同；它们不是总朝右转；它们很不规律。它看起来是随机的，那是因为你不知道它碰上了什么东西；你不知道它们闻到了什么化学物质，或者别的什么。

我想观察的事情当中，有一件是在水干掉的时候，它们会怎么样。有人声称，草履虫会干得像一粒变硬的种子。我在我的显微镜的载玻片上滴了一滴水，在这滴水中是一个草履虫，还有一些“草”——就与草履虫的比例而言，看起来好像是一堆挑棍儿游戏[26]。随着这滴水的蒸发，这需要15到20分钟，草履虫的处境越来越紧巴：前前后后的动作越来越多，直到它几乎动不得。它被卡在那些“棍儿”中间，几乎粘住了。

接着，我看到了某种以前没看到、也没听说的事儿：草履虫失去了它的形状。它能自己伸缩，像个阿米巴虫儿。它开始把自己朝一根儿棍儿推去，开始像叉子那样裂开，一直裂到自己身体中间，那个时候它断定那不是个很好的主意，就又撤了回来。

因此，这些动物给我的印象，是它们的行为在书里被简化得过分了。书上说，它们完全是机械的，或者单一的。那些书应该正确描述这些动物的行为。直到我们看到甚至一个单细胞动物的行为有那么多方面，我们是不可能完全理解更复杂的动物的行为的。

我还喜欢观察虫子。大约十三岁的时候，我有一本昆虫书。书上说，蜻蜓无害，不叮人。在我们的邻居中，大家都知道那些“缝衣针儿”，他们都这么叫蜻蜓，叮起人来是很危险的。因此，如果我们在外边什么地方玩棒球什么的，一只这种东西转着圈儿地飞，大家都会跑着藏起来，挥舞着胳膊，大喊大叫：“一个缝衣针儿！一个缝衣针儿！”

所以，有一天，我在海滩上，看的正是那本说蜻蜓不叮人的书。一个“缝衣针儿”过来了，大家叫着喊着，到处乱跑；我呢，就坐在那儿。“别担心！”我说，“‘缝衣针儿’不叮人！”

这玩意儿落在我脚上。大家都在尖叫，乱成一团，因为这个“缝衣针儿”坐在我脚上。而我却坐在那儿，这个科学奇观，说它不会叮我。

你拿得准，这故事，到头来会说它叮了我——但它没叮。书上说得对。但我确实出了一点儿汗。

我还有一个小小的便携式显微镜。那是个玩具显微镜，我把目镜摘下来，拿在手里，跟拿着放大镜似的，尽管那是个40倍或50倍的放大镜。仔细点儿，你就能对准焦距。因此，我能在街上闲逛，一边还看东西。

我在普林斯顿研究生院的时候，有一次我把它从口袋里掏出来，看在常春藤上乱爬的蚂蚁。我不得不叫出声儿来，我太兴奋了。我看到的是一只蚂蚁和一个蚜虫。蚂蚁照顾着蚜虫——如果蚜虫待的那个植物死了，蚂蚁就把它们搬到别的植物上。作为回报，蚂蚁得到了被部分消化过的蚜虫汁儿，叫“蜜露”。我知道这个；我爸爸告诉过我，但我从来没看见过。

因此，这就是那个蚜虫了，而且再真实不过的是，一只蚂蚁过来了，用脚拍拍它——绕着蚜虫转着圈儿地拍、拍、拍、拍、拍。这可是太令人兴奋了！接着，那汁儿就从蚜虫后窍出来了。因为那是放大了的，那汁儿看起来像是一个好大、好漂亮的、闪闪发光的球，跟气球儿似的，那是因为它表面有张力。因为这个显微镜不怎么好，由于镜片的色差而带上了一点儿颜色——那真是个漂亮的东西啊！

这蚂蚁用两只前脚捧着这个球，从蚜虫那儿举起来，然后抱着它。你可以把水举起来抱着，在这个尺度下看，这世界是如此不同！蚂蚁腿上多半有油性的物质，那样在它抱着水的时候，才不会把水表面戳破。然后，蚂蚁用嘴把这液滴的表面弄破，表面的张力塌陷了，那水珠儿就进了它肚子里。看到这整个事情这样发生，真是有意思啊！

在普林斯顿我的房间里，我有一个凸窗，窗台是U形的。一天，一些蚂蚁在窗台上，在那里转悠着。我发生了好奇心：它们怎么发现东西？我不明白，它们怎么知道往哪儿去？它们能跟蜜蜂似的相互转告食物在哪儿吗？它们有没有几何感？

这纯属业余：大家都知道这个答案，但我当时不知道这个答案，因此，我做的头一件事儿，是通过凸窗的U形窗台垂下一根线，线上系着一片折叠起来的硬纸板儿，硬纸板儿上有糖。这主意是把糖从蚂蚁那里隔离开，所以它们不会碰巧发现糖。我希望把一切都置于控制之下。

接着，我弄了许多小纸条儿，并且把纸条儿折一下，这样我就能把蚂蚁撮起来，把它们从一个地方摆渡到另一个地方。我把那些带折痕的纸条儿放在了两个地方：一些放在放了糖的纸板儿上（吊在线上呢），另一些纸条放在一个有蚂蚁的地方附近。我在那里坐了一下午，一边看书，一边观察，直到一只蚂蚁碰巧走上了那些小纸渡轮中的一个。然后，我把它送到糖那儿。在几只蚂蚁被摆渡到了糖那儿之后，其中的一只碰巧走到了附近的一个渡轮上，我就把它摆渡回原来的地方。

我想看看，其他的蚂蚁需要多长时间，才能得到去“终点渡口”的信息。开始的时候很慢，但越来越快，最后我发了疯似地来回摆渡这些蚂蚁。

一切都按部就班地进行。正在这个时候，我突然不把蚂蚁摆渡到糖那儿，而是把它们发配到一个不同的地点。现在的问题是：蚂蚁学得会从哪儿来，回哪儿去吗？或者说，它能到它在以前的时间里到过的地方吗？

过了一阵子，实际上没有蚂蚁再到第一个地方了（有糖的那个地方），然而第二个地方那儿有许多蚂蚁，在那儿乱转，想找到糖。因此，到目前我琢磨出了它们确实是从哪儿来，还到哪儿去。

在另外一个实验里，我摆了许许多多显微镜的载玻片，让蚂蚁踩着这些载玻片，熙来攘往地朝我放在窗台上的糖那儿奔。然后，用一个新的载玻片替换一个旧的载玻片，或者把原来那些载玻片重新摆一下，我能以此表明，蚂蚁是没有什么几何感的：它们琢磨不透东西都有个地方。如果它们沿着一条路走到糖那儿，回来的时候有一条更短的路，它们总也琢磨不出有这么一条近便路。

通过重新摆放载玻片，另外一件事儿同样清楚：蚂蚁留下了某种痕迹。因此，我就做了许多容易做的实验，来发现那些痕迹需要多长时间干掉，能不能一擦就擦个干净，等等。我还发现，那些痕迹不能指示方向。如果我把一个蚂蚁撮到一张纸上，然后转啊转啊，再把它放回那痕迹上，它是不会知道自己正在背道而驰的，直到它遇到了另一只蚂蚁才恍然大悟。（后来，在巴西，我注意到某种切叶蚁，就拿它们做同样的实验。走不了几步，它们就说得上来自己是朝着食物走，还是南辕北辙

——这想必是根据痕迹判断出来的，这个痕迹或许是一个气味儿序列：A,B，空格儿；A,B，空格儿，如此等等。）

我一度想让蚂蚁走圈儿，但我没有足够的耐心来设计这事儿。除了缺乏耐心之外，我看不出这事儿办不到。

有一件事儿确实能把实验弄麻烦了，就是，你喘气喷在蚂蚁身上，会让它们慌不择路。那一定是个本能的事儿，好防着那些吃它们、骚扰它们的动物。是我呼吸的温度、湿度，还是气味儿打扰它们，这个我不知道；但我在摆渡蚂蚁的时候，总是憋着气，把头转到一边儿看，免得把实验搞乱了。

我迷惑不解的一个问题，是为什么蚂蚁痕迹看起来那么直、那么整齐。蚂蚁好像知道自己在干什么似的，好像有很好的几何感似的。然而，我做的实验，却意在表明它们的几何感是不管用的。

许多年后，我在加州工学院，住在林阴街（Ala-meda Street）的一所小房子里，一些蚂蚁在澡盆上乱爬。我想："机会难得。"我把糖放在澡盆的另一边儿，在那儿坐了一下午，才有一只蚂蚁终于发现了糖。这仅仅是一个有没有耐心的问题。

蚂蚁一发现糖，我就拿起早就准备好的彩色铅笔（我以前做过的实验，表明蚂蚁对铅笔画的道道儿并不反感——它们就在铅笔道道儿上走——所以我知道我没弄乱任何东西），蚂蚁在前头走，我就在它后头画线，这样我就说得上来它的痕迹在哪儿。这蚂蚁走了一些冤枉路，这才回到洞里，因此我画的线就七扭八拐的，不像常见的蚂蚁痕迹。

当第二只蚂蚁找到糖并且开始往回奔的时候，我用另一种颜色的铅笔画它的痕迹。（顺便说一句，它是循着第一只蚂蚁的返程痕迹走的，而不是循着它自己的来路。我的理论，是当一只蚂蚁发现了食物的时候，它留下的痕迹，要比它仅仅是瞎转悠时留下的痕迹，强烈得多。）

这第二只蚂蚁急匆匆地，在很大程度上循着本来的痕迹。因为它走得太快，走得很率直，好像是顺坡儿下路似的，哪管早先的痕迹七扭八拐。经常地，在这只蚂蚁"顺坡下路"的时候，它是会再次发现痕迹的。已经清楚的是，这第二只蚂蚁的返程稍微直一些。更多的蚂蚁，急匆匆地，漫不经心地"循路前进"，对这痕迹的同样的"改进"就发生了。

我在8到10只蚂蚁的后头用铅笔画线，最后沿着澡盆边儿画成了一条整齐的线。这跟画素描似的：你先画一条毛毛糙糙的线，然后你描啊描啊，过一阵子，它就成了一条整整齐齐的线。

我记得小时候我爸爸就告诉我，蚂蚁是多么神妙，它们是怎么合作的。我仔细观察过三四只蚂蚁把一小块儿巧克力往窝里搬。乍一看，那种合作好像颇为高效、奇妙而令人称道。但是，如果看得仔细些，你会看到全然不是这么回事儿：它们那做派，就好像巧克力不在自己人手里

似的。它们朝这边儿拉，向那边儿拽。晃荡，踌躇，方向全乱了套。巧克力呢，并没沿着一条近便的路向窝那边儿移动。

巴西的切叶蚁却非常不可思议，它们有一种怪有意思的蠢劲儿，我很惊讶这种蠢劲儿为什么没进化好。这种蚂蚁要花费相当的工夫，才能切一道圆弧，为的是切下一块儿叶子。切割工作完成之后，蚂蚁有五成机会去拖没被切掉的一边儿，无可奈何地看着刚刚切好的叶块儿掉在了地上。有一半的时间，蚂蚁是在叶子没被切掉的一边儿拽啊拉啊拽啊拉啊，最后作罢了，开始去另外切一块儿。没有一只蚂蚁打算去拿早先切好的叶块儿，别的蚂蚁也不去拣别人切掉的叶块儿。因此，事情很明显，如果你看得仔细的话，切割，然后把叶块儿搬走，这活儿做得不地道；它们走到叶子那儿去，切一个弧线，一半时候是拖错误的一边儿，本该拖的叶块儿，掉下去了。

在普林斯顿大学，蚂蚁发现了我的食品柜。里头放着我的果酱、面包和菜什么的。这柜子离窗户距离相当远。一长串儿蚂蚁，横穿客厅的地板，兼程行军。那时我正在做关于蚂蚁的这些实验，因此我心里想："我怎么才能阻止它们到我的柜子那儿去，却不杀死任何蚂蚁？不准放毒，你对蚂蚁也得讲人道不是！"

我的搞法是这样：在准备阶段，我把一丁点儿糖放在它们进入这房间后六七厘米的地方，这个它们不知道。然后呢，我又干起了摆渡的营生，每当有一只蚂蚁带着吃的往回赶却误上了我的渡船的时候，我就带它一程，把它放到糖上。任何往我的柜子那儿去却误上了渡船的蚂蚁，我也把它带到糖那儿。最后，蚂蚁们发现了从糖到窝的道儿，因此这条新痕迹得到了双倍的强化；老痕迹呢，越来越没蚂蚁用了。我知道，半个来钟头之后，老痕迹就干了，一个钟头之内，它们就离开我的食品柜。我没洗地板；除了摆渡蚂蚁，我什么也没做。

第3部分　费曼，炸弹和军队

嘶嘶的信管

战争在欧洲开始了，美国还没宣战，那时就起了许多议论，说是要准备打仗，要爱国。报纸上有大块儿的文章，说商人们自告奋勇，到了纽约州东北的普拉茨堡（Plattsburg），去接受军事训练什么的。

我开始想了，我也该做点儿什么贡献啊。我在麻省理工学院完成了学业之后，我兄弟会里的一个朋友，在“陆军信号团”的毛里斯·迈耶（Maurice Meyer），就带我去见在纽约的信号团部的那位团长。

“长官，我愿意为国家出力，因为我有技术头脑，或许有我帮得上忙的地方。”

“那个，你最好直接去普拉茨堡的新兵营，去接受基本训练，然后呢，我们才能用你。”团长说。

“可是，有没有什么更直接的法子，来用用我的本事啊？”

“没有，军队嘛，就是这么组织的。按部就班地来吧。”

我到了外边儿，坐在公园里想这事儿。我想啊想啊：做贡献的最好办法，或许还是得按照他们的路子来。可是，幸运的是，我又动了点儿脑子，说，“见它的鬼去！我还是等等吧。或许会发生点儿什么事儿，到时候他们就能更有效地用我。”

我到普林斯顿读研究生去，春天的时候，我又去了趟在纽约的贝尔实验室，想为暑假找份儿工作。我喜欢到贝尔实验室去。比尔·肖克利，就是发明晶体管的那家伙，带我到处看。我记得有个人的房间，他们在那窗玻璃上画了些道道：乔治·华盛顿大桥正在施工，那些家伙在实验室里看它。在主钢缆吊起来的时候，他们把主钢缆的曲线描在了窗玻璃上；到大桥悬挂在主钢缆上的时候，它就变成了一条抛物线，他们就能测量出一些小小的变化。这种事儿，就是我想干的。真羡慕这帮家伙！我总在希望，有朝一日能和他们一道干活儿。

实验室的几个家伙，把我弄到一个海鲜馆儿吃午饭。有牡蛎，大家都眉开眼笑。我住在海边，可这种东西，我都懒得睁眼看；我不吃鱼，牡蛎，更甭提了。

我心里说：“我得勇敢点儿。我一定得吃个牡蛎。”

我吃了一个牡蛎，这东西绝对恐怖。但我对自己说：“这并不足以证

明你是条汉子。你原本并不知道它有多么恐怖。在它什么味儿还不清楚的时候，吃它就不算是顶难的事儿。”

别人一直在吵吵牡蛎有多么美，我于是又吃了一个，实在比第一个更难以下咽。

这次，一定是我第四或第五次到贝尔实验室来，他们接纳了我。我非常高兴。那年头儿，要找到个工作，和别的科学家在一块儿，难了。

但是，那时普林斯顿大学，有个激动人心的大事。从军队来的特雷彻尔（Trichel）将军，给我们讲话：“我们一定要有物理学家！物理学家，对我们这些在军队里的人来说，是很重要的！我们需要三个物理学家！”

你一定得明白，那年头儿，大家不怎么知道物理学家是个什么东西。比方说，爱因斯坦以数学家知名——有人需要物理学家，这事儿透着稀奇。我想，“这是我做贡献的机会啊。”我就志愿去为军队工作了。

我问了贝尔实验室，他们让不让我在夏天为军队工作，他们说，他们也有战时的工作，何必舍近求远。但我被爱国狂热冲昏了头，失去了这个好机会。在贝尔实验室工作，那要聪明得多。但人在那个时候，都有点儿傻。

我去了位于费城的法兰克福兵工厂（Frankford Arsenal），在一头恐龙身上工作：那是一台用来为炮兵定向的机械计算机。每当有一群飞机飞过，炮手会用望远镜观察，这个机械计算机，装着些齿轮和凸轮什么的，能预言飞机会往哪儿飞。这机器的设计和建造，都是顶漂亮的。其中重要的主意之一，是非圆齿轮——齿轮不是圆的，但无论如何还能互相啮合。因为齿轮的半径是变的，所以一个轴转，就能对另一个轴产生作用。然而，这机器已经英雄迟暮了，那之后不久，电子计算机应运而生。

物理学家对军队有多么重要，说了这么一通之后，他们让我干的头一件事儿，是检查齿轮的设计图，看看数据对不对。这事儿做了好长时间。后来，渐渐地，负责这个部门的那家伙，看出我在别的事儿上能派上用场。随着夏天一天一天地过去，他跟我讨论事儿的时间越来越多。

法兰克福兵工厂有个机械工程师，老想设计个什么玩意儿，可是怎么也不能把事儿弄停当。有一次，他设计了一个满是齿轮的盒子，其中有一个直径8英寸（约20.3厘米）的大齿轮，有六根轮柄。这伙计兴高采烈地说：“好了，老板，怎么样？怎么样？”

“蛮不错的！”老板回答，“你们该做的，是确定每条轮柄的过轴器，好让这齿轮转得起来！”这家伙设计的过轴器，却刚好卡在两个轮柄中间！

老板继续告诉我们，真有过轴器这么个东西（我还以为他一直在开玩笑呢）。在战争期间，德国人在水下一定深度弄了缆绳，上面挂着水雷，为了不让英国的扫雷艇扫到这个缆绳，德国人发明了这个东西。用这些过轴器，德国缆绳允许英国的缆绳滑过去，跟走过了一道旋转门儿似的。因此，在每个轮柄上装上过轴器，是可能的，但老板的意思，并不是让机工去弄得那么麻烦。那家伙倒是应该重新设计一下，把轴挪一挪。

军队时不时地派个中尉来检查事儿搞得怎么样。我们老板说，我们这是个民营单位，那个中尉比我们任何人地位都高。“什么事儿，也别告诉中尉，”他说，“一旦他明白我们在干什么，就会发号施令，把事情搞乱。”

那时我正在设计一些东西，中尉从旁边走过的时候，我就假装我不明白我在做什么，我只是听人家吩咐而已。

“你在这儿干什么，费曼先生？”

“那个，我在以一些连续角度画一组直线，然后，人家让我照着这个表格，来测量从中心点的不同距离，然后再把……”

“好了，那是什么啊？”

“我猜是个凸轮。”实际上那东西是我设计的，但我演得就好像我是在亦步亦趋地按照别人的吩咐做活儿。

中尉在任何人那里都得不到信息，我们倒逍遥自在，用这台机械计算机工作，没有遇到任何干涉。

一天，中尉走过来，问了我们一个简单的问题：“假定观察员和炮手不在同一个位置——你们怎么处理这个事儿？”

我们吓了一跳。我们用的是极坐标，是用角度和半径距离，来设计这整个东西的。用X、Y坐标，对在别处的观察员来说，是容易矫正错误的。那仅仅是个加减法的问题。但是用极坐标的话，那就一团乱麻了！

这个中尉，我们一直什么也不告诉他，可到头来，是他告诉了我们一件重要的事，我们在设计这个设备的时候，给忘了：炮和观察站有可能不在同一个地方啊！改正这个，费了老劲。

到夏末，我得到了我第一个真正的设计工作：英国有了一项新发明，叫“雷达”，用来追踪飞机。它每15秒钟出来一个点儿。我得设计一台会把一组点儿连成一条连续曲线的机器。那是我第一次设计机器，所以我有点儿害怕。

我去找另外那些家伙中的一个，说：“你是个机械工程师，怎么搞机

械工程，我不懂，我刚接了这个活儿……”

“那没什么，”他说，“瞧，让我弄给你看。设计这些机器，有两个原则，你得知道。第一，每个轴承上的摩擦力是多少多少，以及每个齿轮接合处的摩擦力是多少多少。有了这个，你算得出来，你需要多大力量来驱动这玩意儿。第二，你有了齿轮齿数比，比方说2比1，你就琢磨了，是弄成10齿对5齿、24齿对12齿还是48齿对24齿，要决定这事儿，得这么办：你查查《波士顿齿轮目录》，从列表里选你要的齿轮。表上靠高的那一头儿，齿儿太多，难造得很。假如他们能把齿儿造得更精细一些的话，那列表还得更高。在列表低的那头儿，齿轮的齿数太少，很容易断的。因此，最好的设计，是用表中间的那些齿轮。”

我在设计那台机器的时候，得到了不少乐趣。仅仅从列表的中间部分挑选齿轮，再把他给我的那两个数据的转矩加起来，我就是个机械工程师了！

那个夏天之后，军队不想让我回普林斯顿去读学位。他们不停地让我做这种爱国的事儿。如果我愿意留下来，他们会把一个项目整个给我，还让我管理。

这个问题是设计一台机器，像上一台那样——他们称之为指挥家——但这次我觉得这问题容易些，因为炮手将在同一高度咬住另一架飞机。炮手会把他的高度和他到被他咬着的飞机之间的大体距离，弄进我的机器里。我的机器将自动把炮调整到正确的角度，然后点燃信管。

作为这项目的主任，我要旅行到阿伯丁市（Ab-erdeen）去拿射表。可是，他们已经有了一些初步的数据。我注意到，在飞机会飞到的比较高的高度上，大多数没有什么数据。于是我打电话想搞清楚为什么没有数据，原来他们用的信管不是定时信管，而是在那样的高度不管用的导火线信管——在稀薄的空气里，嘶的一声就灭了。

我想，我只好矫正一番，以适应不同高度的空气阻力。可我的工作是发明一种机器，让炮弹在该爆炸的时候爆炸，而那时信管是点不着的！

我断定这事儿对我太难了，于是我回了普林斯顿大学。

考验猎犬

我在洛斯阿拉莫斯（Los Alamos）的时候，有点儿闲工夫，经常坐几个小时的车，去看在阿尔伯克基（Albuquerque）住院的妻子。有一次我去看她，不能马上进病房，于是我就到医院图书馆看书。

在《科学》（Science）杂志上，我读到一篇关于猎犬的文章，说它们的嗅觉如何了得。作者说了他们做的好几个实验——猎犬能确定哪些

物件被人动过，等等——我开始想：闻东西，猎犬确实是非同凡响，能追踪人留下的气味儿，诸如此类。可是，我们到底怎么样？

到可以看我妻子的时候，我就去看她了，说：“我们做个实验。那里的那些可乐瓶子（她积了六捆空可乐瓶子，好一总送出去）。你好几天没动它们了，对吧？”

“对啊。”

我把六捆瓶子拿到她那儿，手没碰瓶子，说：“好了。我现在出去，你拿一只瓶子，在手里摩挲大约两分钟，然后放回去。然后，我回来，看能不能说得上来是哪只瓶子。”

于是我就出去了，她拿起一只瓶子，摩挲了好长时间，因为我可不是猎狗啊！照那文章上的说法，你就触摸一下，猎狗也嗅得出来。

然后，我回来了，绝对明显！我甚至不必闻那破玩意儿，因为温度当然就不同。气味儿也很明显。你一把它凑近你脸边，你就闻得出来它潮乎乎的，热乎乎的。因此，那个实验不算数儿，因为太明显了。

然后，我看了看书架，说：“那些书，你有日子没看了，是不是？这次，我出去的时候，你从架子上拿一本书，就那么一翻——别再干别的——再合上，放回去。”

我又出去了，她拿了一本书，翻开，合上，放回原处。我进来了——这也没什么！容易。你只要闻闻那些书就行了。这很难解释，因为我们通常不谈论这个。你把每本书凑近鼻子，嗅几次，你就认得出来。那是很不同的。一本书，在那里放了一阵子，有一种干燥无趣的味儿。但是有一只手动过它，就有湿度，就有一种明显的气味儿。

我们又另外做了几个实验，我发现，猎犬确实是能耐不小，可人类也不像自己想的那样无能：只是人的鼻子离地面太高罢了！

（我注意到，我的狗闻闻我的脚印，就能正确地认出我在家里走的路线，特别是在我赤脚的时候。因此，我也想试试这个：我手脚并用，在地上爬，一边还嗅着，想看看我能不能认得我走过的和没走过的地方有什么不同，而我发现不可能。因此，狗比我强得多。）

许多年后，在我初入加州工学院的时候，在巴舍（Bacher）教授家里有个聚会，加州工学院的许多人都在那儿。我不知道怎么提到了这事儿，但是我把闻瓶子、嗅书的故事告诉了他们。自然，他们一个字儿也不相信，因为他们总以为我弄虚作假。我就不得不演示一番了。

我们小心从架子上取下八九本书，没直接用手动，然后我出去了。三个不同的人动了三本不同的书：他们各自拿起一本书，打开，合上，放回去。

然后，我回来了，闻闻每个人的手，然后把那几书都闻遍了——我忘记先闻的是哪一本——有一丝不爽地找到了那三本书，但把一个人认错了。

他们仍然不相信我，他们以为我在变什么戏法。他们不停琢磨我是怎么弄的。这种把戏人尽皆知，人群里有个托儿，给你发暗号儿，他们都在琢磨谁是托儿。从那以后，我经常想，这倒是一个不错的牌戏：拿一副纸牌，让一个人抽出一张，再放回去，而我在另一个房间里。你说："我会告诉你，你抽的是哪一张，因为我是一只猎犬：我要把每一张牌都嗅一嗅，然后告诉你抽的是哪一张。"当然，你这么喋喋不休的，大家就一时不会相信你实际上做的那件事！

人的手，其味殊异——所以狗能辨人。你可得试试！全部的手，都有一种潮乎乎的味儿。一个烟民的手，其味儿大不同于不抽烟的。女士所用的香水儿常常不同，诸如此类。如果有人碰巧口袋里装着硬币，碰巧他在口袋里玩弄那些硬币，你也闻得到。

从低处看洛斯阿拉莫斯27

当我说"从低处看洛斯阿拉莫斯"的时候，我是实话实说。在目前，在我的专业领域里，尽管我是个有点儿名气的人，可在当时，我完全不是个有名气的人。我开始参加"曼哈顿计划"的时候，甚至连个学位也没有。对你讲洛斯阿拉莫斯的故事的许多人——那些高高在上的人——对某些军国大计都忧心忡忡。没什么军国大计让我忧心忡忡。我总在下层扑腾。

有一天，我在普林斯顿大学我的房间里工作，鲍勃·威尔逊（Bob Wilson）进来了，说他已经得到资金，要做一项秘密工作。他本不该对任何人提起这个，但他要告诉我，因为他知道，一旦我知道他要干的是什么，我就会明白我非得入伙儿不可。因此，他告诉我，把铀的几种同位素分离开，最终为了造一个炸弹。他有一种办法，可以把铀的同位素分离开（和最终用来造炸弹的那一种不同），他想发展这种方法。他把这个告诉了我，说："有个会……"

我说，我不想干这个。

他说："那好吧，三点有个会。会上见。"

我说："你把这个秘密告诉了我，没关系，因为我不会告诉任何人，但我不干。"

因此我就回头去忙我的学位论文了——忙了大约3分钟。然后，我在地板上来回踱步，想这事儿。德国人有希特勒，他发展原子弹的可能性是明摆着的。他们在我们之前发展起这东西，这种可能性是非常可怕的。因此，我决定三点去开会。

到四点，我已经在一个屋子里伏案工作了。我在忙着计算，看这个特别的办法，是不是会受到从离子束中得到的电流总量的牵制，等等。我就不说得过细了。但我得在那儿工作，我得写论文。我尽可能卖力地工作，尽可能快地工作，好让那些在那儿建造设备的人马上进行实验。

这像是那种电影，你看到一台设备在“嘟、嘟、嘟”地响。我每次去看这设备，它就变大了些。当然，实际上发生的事情，是所有的伙计都决定为此工作，都把他们的科研停了下来。在战争期间，全部的科研工作都停了，除了洛斯阿拉莫斯做的这一小块儿。这也不算什么科学。在很大程度上，它属于工程。

来自各种科研项目的全部设备，都凑一块儿，弄成了这么一个新设备，好做实验——分离铀的同位素。出于同样的原因，我也把自己的工作停了，尽管过了一阵子之后，我确实休了6个星期的假，把学位论文写完了，刚好在到洛斯阿拉莫斯之前，拿到了学位——因此，我的地位并不像我让你相信的那样，低到那么个程度。

我在普林斯顿见到了许多大人物，这是我参加这个项目较早时候的有趣经历之一。我以前没见过几个大人物。但是，有个评估委员会，不得不一直帮我们的忙，并且帮我们在最后决定我们将用什么办法来分离铀的同位素。这个委员会有像康普顿[28]、塔尔曼（Tolman）、史密斯（Smyth）、尤里[29]、拉比[30]、奥本海默[31]这些人。我参加这个委员会，是因为我懂分离铀同位素的方法的理论，因此他们要问我问题，跟我讨论。在这样的讨论中，一个人先提出一个论点。然后，比方说，康普顿会解释一个不同的论点。他会说，那个事儿会是这个样子，而他完全对。另一个家伙会说，那好，也许吧，但存在另一种与它相左的可能性，我们不得不加以考虑。

因此，满桌子的人，意见不一，众说纷纭。康普顿不重复也不强调自己的论点，这叫我既吃惊，又不安。最后，塔尔曼，他是主席，会说：“好了，听了这么多论点，我猜康普顿的论点是最好的，现在我们必须开始干了。”

委员们可以提出一大堆想法，每个人都考虑到了一个新的方面，还得记住别的伙计们说的是什么，因此，到最后，决定是根据最好的看法做出的——把一切做了归纳——不需要说上三遍。看到这么个搞法，我深受震撼。这些人真是非常了不起。

最终的决定是：他们将用来分离铀的计划，不是这个计划。有人告诉我们，我们将停下来，因为，在新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯，他们将启动一个真正用来制造那种炸弹的计划。将会有一些我们必须做的实验，也有理论上的工作要做。我做的是理论工作。其他伙计都做实验工作。

问题是——现在干什么？洛斯阿拉莫斯还没准备好。鲍勃·威尔逊想

利用这段时间，除了其他的事情要办之外，派我到芝加哥去发现和这炸弹有关的任何东西和问题。接下来，在我们的实验室里，我们开始制造仪器、各种各样的计算器等东西。等我们到了洛斯阿拉莫斯，这些东西都会用得上。没时间可浪费了。

我受命到了芝加哥，到各个研究单位，告诉他们我会跟他们一起工作，让他们足够细致地为我解释某个问题，那样我才能真正坐下来开始解决这个问题。一到这个程度，我就去找另一个家伙，问另一个问题。这样我就理解了一切事情的细节。

这是个很好的主意，但我有点儿歉疚，因为他们都要卖力气为我解释事情，而我拍拍屁股就走了，也不帮他们一把。但我很幸运。有个家伙对我解释一个问题的时候，我说："你为什么不在积分符号内取微分？"半个小时，他就把这问题解决了，而他们已经为此忙活了3个月。因此，利用我的"与众不同的工具箱"，我也做了一点儿事儿。然后，我从芝加哥返回，把情况交代了一番——释放出来的能量有多大，这炸弹会是什么样子，等等。

我记得和我一起工作的一个朋友，保罗·奥拉姆（Paul Olum），一个数学家，事后过来对我说："等人家为这事儿拍部电影的时候，他们会让那个从芝加哥回来的家伙，为普林斯顿那儿的人做一场关于这个炸弹的报告。他会穿一身西服，夹着公文包，如此这般——可现在，你袖子脏乎乎的，就跟我们讲这件惊天动地的事儿。"

似乎还得拖延，威尔逊赶到洛斯阿拉莫斯，看看到底什么事情扯了后腿。等他到了那儿，他发现，建筑公司很卖力气，剧院盖好了，几个他们明白的建筑也盖好了。可是，怎么盖实验室——需要几条煤气管道，供水量是多少，他们还没得到明确指示。威尔逊腾地一下就站起来了，当即告诉他们多少水、多少煤气等事情，告诉他们开始建造实验室。

等他回到我们这儿，大家都跃跃欲试，急不可待了。因此，他们都凑在了一起，决定我们无论如何该出发了，尽管那儿还没准备好。

顺便说一句，我们都是奥本海默和其他几个人招到这儿的。奥本海默可真沉得住气。每个人的困难，奥本海默都在看在眼里。他为我妻子担心，她得了肺结核，那儿有没有医院，有没有这个那个。我这么亲密地跟他接触，这是第一次，他是个好人。

我们奉命要小心行事——比方说，不要在普林斯顿买火车票，因为普林斯顿是个小站，如果大家都在普林斯顿买票到新墨西哥州的阿尔伯克基，有人就会猜疑，有大事儿了。因此，大家都是从别的地方买的票，只有我是个例外，因为我琢磨着，如果人人都在别的地方买票……

因此，到了火车站，我说，"我要到新墨西哥州的阿尔伯克基。"那人说，"哦，这么说，那么多东西，全都是给你准备的！"成箱成箱的仪

器，我们已经托运了好几个星期，没指望他们会注意地址是阿尔伯克基。因此，我至少得解释我们为什么要托运那些箱子，是我要去阿尔伯克基啊。

好了，我们到的时候，房子、宿舍什么的，还没准备好。实际上，连实验室也差得远。我们提前来，是催他们。因此，他们急成了热锅上的蚂蚁，把附近农场的房子都租了下来。我们先是待在一所农场的房子里，早晨开车去基地。第一个早晨，我开车的时候，印象太深刻了。美丽的景色，对一个不怎么旅行的东边人来说，真是大饱眼福啊。那儿有你或许在画里才能看到的万丈悬崖。你是从下边开车上来的，可在山顶的平地上极目四望，真令人瞠目结舌。在我往上走的时候，给我印象最深刻的东西，我说，印第安人或许在那儿住过，开车的伙计把车停了，走过拐弯，指给我看你能看到的印第安人的一些洞穴。真令人兴奋。

等我第一次到了目的地，我看到有个技术区，那最后是应该用围栏围起来的，但仍然敞着。还应该有一个小镇子，也就得有大围栏把镇子围起来。但是，他们现在还在建造呢，我朋友保罗·奥拉姆，他是我的助手，手里拿着个写字夹板，站在门口儿，对出入的卡车进行检查，告诉他们该往哪边儿去，把材料卸在不同的地方。

走进实验室的时候，我见到了一些人，我在《物理评论》上看过他们的文章，那时是只闻其名，未见其人。“这是约翰·威廉姆斯（John Williams）。”他们说。其时有个家伙从铺着图纸的桌子后面站起来，挽着袖子，朝窗外喊，命令卡车和东西跟着建筑材料往不同的地方去。换句话说，在建筑和设备准备停当之前，实验物理学家无事可做，于是他们就去盖房子——或者到建筑工地上当小工。

另一方面，理论物理学家，可以马上开始工作，因此事情决定了，他们不住在农舍里，而住在基地。我们当即开始工作。没有黑板，只有一个带轮子的黑板。当我们推着这个带轮子的黑板到处走的时候，罗伯特·瑟伯（Robert Serber）就告诉我们他们在加利福尼亚大学伯克利分校（Berkeley）对原子弹、核物理这类事情所做的思考。我对这些东西，知道得不很多。我以前干的是别的。因此，我要做的事情，太多。

我每天都研究、阅读、研究、阅读。那时流行肺结核。可我有点儿运气。全部的大腕儿，碰巧在那个时候都离开了，除了汉斯·贝特[32]。贝特需要有个人跟他谈话，跟他唱唱对台戏。好了，他到办公室找到了我这个小碎嘴子，开始论证，解释他的看法。我说：“不，不，不，你发疯啊。它是这么弄的。”他说，“稍等。”解释为什么说他没疯，我疯了。我们就这么不停地吵吵。你瞧，我听到有人讲物理，我满脑子全是物理，我忘记我在跟谁讲话，所以我就说些傻话：“不，不，不，你错了”或者“你疯了”之类。但结果证明，那正是他需要的。由于这个，我倒升了一级，在贝特手下当了个小组长，管着四个家伙。

当我第一次到那儿的时候，我已经说过，宿舍还没准备好。但理论

物理学家无论如何必须待在那儿。他们先是把我们扔到了一所老旧的学校建筑里——有个小伙子以前在那儿上学。我住在一座名叫“力学山居”的什么玩意儿里边。我们全挤在那里的双层床上，而且那儿不那么有秩序，鲍勃·克里斯蒂（Rob-ert Christy）跟他老婆到浴室，必得经过我们的房间。因此，很不舒服。

宿舍终于盖好了。我就到分派房间的那地方，他们说，你可以挑房子了。你知道我怎么办的？我在看女孩儿们的宿舍在哪儿，然后我挑了一间正对着她们宿舍的房间——尽管我后来才发现，那个房间的窗户前边，正好有一棵大树。

他们告诉我，一个房间住两人，但那仅仅是暂时的。每两个房间共用一个洗澡间，每个房间有一张双层床。但我不想两人住一个房间。

我住在那儿的那天晚上，没别人，我就企图把这个房间据为己有。我妻子在阿尔伯克基患着肺结核，但我有她的几箱子东西。于是我把一件小睡裙拿出来，把上床的被子扯开，把小睡裙漫不经心地放在那儿。我还拿出几双拖鞋，在洗澡间地上撒了一些扑面粉儿。我就是要弄得好像那儿有别人住似的。结果怎么样？哈，那本该是男宿舍，明白吧？因此，那天晚上我回来的时候，我的睡衣叠得好好的，放在枕头下，拖鞋整整齐齐地放在床下。女睡裙叠得好好的，放在枕头下，床都拾掇好了，整理好了，拖鞋放得整整齐齐。洗澡间地板上的扑面粉儿擦干净了，没人在上床上睡。

第二天晚上，照旧。起床的时候，我把上床弄乱，把睡衣邋里邋遢扔在上面，在洗澡间撒了扑面粉儿，等等。我这么折腾了四个晚上，大家也都搬过来住了，没有往这房间再塞进一个人的危险了。每天晚上，每件东西都整理得整整齐齐，尽管这是一个男人的宿舍。

我当时不知道，这个小小的诡计把我卷进了政治。那儿有各种各样的小帮派，这是当然的——家庭妇女帮，机修工帮，技术人员帮，如此等等。好了，住在这宿舍的单身汉和单身女，觉得他们也得有个帮，因为公布了一条新规定：“妇女不得留宿男宿舍。”哈，这绝对是荒唐嘛！毕竟，我们都是成年人！这是扯的什么淡啊？我们一定要采取政治行动。于是我们对这事儿进行了辩论，大家推举我，在镇议会里做住宿舍的这些人的代表。

到我来这里大约一年半，我对汉斯·贝特谈了点儿事儿。他一直在这个大议会里担当职务，我把我用我妻子的睡裙和拖鞋玩儿的那套把戏告诉了他。他哈哈大笑。“原来你是这么混到镇议会里的。”他说。

事儿得从头儿说起。有个女人在宿舍里打扫卫生，一不留神，出了个麻烦：有个女的在跟一个男人睡觉！她把这事儿向女工长打了报告，女工长又向中尉打了报告，中尉又向少校打了报告。就这么逐级上报，报告通过将军们，一直到了管理委员会那儿。

他们要干什么？他们会考虑这事儿，还能怎么样！可是，与此同时，有指示通过总指挥，下达到少校，下达到中尉，下达到工长，下达到女工长。什么指示呢？“不要打草惊蛇，一切都照原样儿，把卫生收拾干净，静观其变。”第二天，还是同样的报告。过了四天，他们着急了，不知所措了。最后，他们宣布了一条规定：“妇女不得留宿男宿舍！”这使得下面的人大发牢骚，他们不得不推举一个人做代表……

我愿意告诉你一点儿关于那里的检查制度的事儿。他们决定做某种全然违法的事情，对美国人民的信件进行检查——他们是没权力这么办的。事情非常敏感，要立规矩，那也得出于自愿。大家往外发信的时候，都主动不把信封糊上。他们也可以随便检查发给我们的信。我们让信封敞着，如果信OK，他们就把信封糊上。如果在他们看来信不OK，他们就把信退给我们，还别上个纸条儿，说，根据我们的“谅解”，信里有一段违反了什么什么。

就这么着，在这些特别在乎思想自由的科学家中间，检查制度终于建立起来了，条条杠杠多的是。我们可以对这种管理特色发表评论，因此我们也可以写信给我们的参议员，告诉他我们不喜欢这么个搞法。他们说，如果有什么不妥，他们会通知我们的。

规矩立起来了，检查制度执行的第一天到了：电话！丁零零零零！

我问：“什么事儿？”

“请过来一下儿。”

我过来了。

“这是什么？”

“家父书信。”

“那，这是什么？”

那是张印了横线的信纸，横线是小点点儿组成的——四个点儿在下头、一个点儿在上头、两个点儿在下头、一个点儿在上头，点儿在点儿下头——

“这是什么？”

我说：“密码。”

他们说：“是啊，是密码，可它说的是什么？”

我说：“我不知道它说的是什么。”

他们说：“那好，解码表呢？你怎么翻译它？”

我说：“哈，我不知道。”

他们说：“这是什么？”

我说：“拙荆来函——它说TJXYWZTW1X3。”

“那是什么？”

我说：“另一套密码。”

“解码表呢？”

“我不知道。”

他们说：“你收到了密码，却不知道解码表？”

我说：“正是如此。我做了个游戏。我向他们挑战，任由他们给我发来什么密码，我都能破译，明白吧？所以呢，他们就在那边儿造密码，把密码发到这儿来，他们可不会把解码表告诉我。”

检查制度里有一条：要是你在信里写些一般的东西，他们一点儿也不会找你麻烦。因此，他们说：“好吧，你一定得告诉他们，请把解码表和密码一块儿寄来。”

我说：“我不想看解码表！”

他们说：“那好，我们会把解码表拿出来。”

于是我们就达成了这么个协议。行不行？没问题。第二天，我收到了我妻子的一封信，信里说：“给你写信可真难，因为我老感觉那个……在我肩膀头上偷看呢。”那个词儿所在的地方，是一片用橡皮擦出来的污迹。

我因此到局子里去了一趟，我说，“要是你们不喜欢这信，你们也不该在信上动手动脚啊。你们可以看，但你们不该把信上的什么东西弄没了。”

他们说：“不要无理取闹。你以为那是检查员的工作方式——用橡皮擦？他们是用剪刀把东西剪掉啊。”

我说，得。于是我给我妻子回了封信，说：“你用橡皮擦过你的信吗？”她回信说：“没有啊，我没用橡皮擦过我的信啊，那一定是……”——纸上给剪了个窟窿。

于是我就去找少校大发牢骚，他得负责所有这类事儿。你知道，这得费点儿时间，但我觉得自己好歹也是个代表啊，是非曲直，得搞明白。上校跟我解释说，那些身为检查员的人，我们教过他们怎么办事，

但他们理解不了这种新的工作方式，我们必须非常细致才成。

不管怎么样，他说：“怎么样，你认为我心肠不坏吧？”

我说：“是的，你心肠好得不得了，但我认为你没权力。”因为，你知道，他走马上任干这个工作已经三四天了。

他说：“我倒要看看马王爷长了几只眼！”他抓起电话，一切都摆平了。没人再对信动剪刀了。

然而，还有另外许多麻烦。比方说，有一天我收到了我妻子的一封信，带着检查员的条子：“里面的信是用密码写的，但没有解码表，因此我们把这封信保存在别处。”

那天我到阿尔伯克基去看我妻子的时候，她说：“那，那东西都哪儿去了啊？”

我说：“什么东西啊？”

她说：“一氧化铅，丙三醇，热狗，换洗衣服。”

我说：“稍等——是一个列表？”

她说：“是的。”

“那是密码啊，”我说，“他们都以为那是密码——一氧化铅，丙三醇，等等。”（她要一氧化铅和丙三醇来制造一种黏合剂，好修补她的玛瑙盒子。）

头几个星期，总有这种事儿，然后我们才把事情摆平了。无论如何，有一天我在摆弄计算器，我注意到一件很奇异的事。如果你用1除以243，得数是0.004115226337……这很好玩儿。你要是把小数点后的数一直写下去，那么到“559”之后，那数就有点儿歪歪扭扭了，但它很快就又整齐了，好好地重复自己。我认为这是个乐事儿。

好吧，我就把这个东西塞在信封里，寄出去，信又回到我这儿。这信没过关，小纸条儿说：“看第17条B款。”我看了第17条B款，是这么说的，“信件要用英语、俄语、西班牙语、葡萄牙语、拉丁语等语言来写。用任何其他语言来写信，必须得到许可。”然后，它还说，“不准用密码。”

于是我就给检查员写了一个小纸条儿，附上我的信，纸条儿说，我觉得这封信当然不可能是密码，因为如果你真的用1除以243，事实上你确实会得出那样的得数，因此，在0.004115226337……这个数中，难得有别的情报，如此等等。我因此就要求允许我在信里使用阿拉伯数字。我因此让那封信通过了。

来往信件总是遇到某种麻烦。比方说，我妻子老是提起她写信时的那种不自在劲儿，好像检查员老隔着她肩膀偷看。现在，作为一条规定，我们不准提检查制度的事儿。我们是不会提这个的，可他们怎么告诉她呢？因此，他们老是给我发条子：“你妻子提到了检查制度。”我妻子提到检查制度，那是肯定的。因此，他们最后给我发了个条子，说：“请通知你妻子，不要在她的信中提到检查制度。”于是我这么开始写信：“我得到了指示通知你，在你的信中不要提到检查制度。”哈，哈，这怎么又提啊！于是我写道：“我得到指示通知我妻子不要提到检查制度。可我怎么弄这个事儿？另外，我为什么必须得指示她不要提到检查制度？你们有什么事儿瞒着我？”

有趣儿的是，那个检查员自己不得不告诉我让我告诉我妻子不要告诉我她……但是，我们早有应对。我们说，是的，他们担心信件在从阿尔伯克基的来路上被截获，如果有个人看了信，他或许就会发现这里有检查制度，她能不能正常一点儿。

因此，我下次到阿尔伯克基，跟她说：“注意了，我们别再提检查制度了。”但我们有过这么多麻烦，我们最后真的想出了一种密码，这可是违法的。如果我在我的署名后边加一个小点儿，那意味着我又遇到了麻烦，她就采取她早已炮制好了的下一个步骤。她一天到晚坐着无事，因为她病了，会想出怎么办的办法。她最后办的一件事，是给我寄了一张广告。她发现这广告完全合法。广告上说，“给您的男朋友寄一个拼字游戏。我们把空白组合卡卖给您，您在上面写信，然后打乱它，装进一个小袋子，寄出去。”我收到了这个，纸条上说：“我们没有时间玩游戏。请告诉你妻子自我约束，按常规方式写信。”

我们还准备了两个点的密码，但他们及时改进了工作，我们也就不必用它了。我们为下一封信准备的东西是这样：信在开头儿说，“我希望你打开这信的时候小心点儿，因为我把给你的胃药粉末装在这信封里了。”那封信里会装满药粉儿。我猜他们在办公室拆信的时候会拆得很快，药粉儿会撒了一地，他们都会气坏了，因为你不想让任何人生气。他们还得把药粉儿收拾起来……但我们不必用那些药粉儿的。

有了这些和检查制度打交道的经验，我就完全知道什么信是通得过的，什么信是通不过的。没人比我知道得更清楚。我因此还为此打赌，赢了一点儿小钱儿。

有一天，我发现住在远处的工人，想进来的时候，懒得绕远路走正门，就在围栏上扯了一个洞。我就从大门口儿出去，从那个洞进来，再出去，再进来，直到那个中士感觉到什么事儿不对劲儿了。这家伙，只见人出去，不见人归来，这是怎么搞的？当然，他自然的反应，是把中尉喊了来，想为此把我扔到监狱里。我解释说，有个洞。

你看，我总是帮助人家改进工作，因此，我跟一个人打赌，我可以把围栏上有个洞这回事儿写在信里，我就把信寄出去了。我真的这么做

了。我做的方式，正像这里说的。你应该看到他们是怎么管理这地方的（我们得到允许，可以说这样的话）。离什么什么地方71英尺（约21.6米）的地方，围栏上有个洞，有多么多么大，你可以走过去。

现在，他们能干什么呢？他们没办法跟我说，没这么个洞。我的意思是，他们会做什么？有这么个洞，算他们倒霉。他们应该把洞补上。因此，这封信通过了。

还有一封信也通过了，信里说的是在我小组里工作的一个小伙子，约翰·肯马尼（John Kemeny）。军队里的几个白痴，半夜里把他弄醒，拿灯晃着审问他，因为他们发现了和他父亲有关的什么事儿，相信他父亲是个共产党什么的。肯马尼现在是个有名的人。

还有另外一些事儿。跟指出围栏上的洞相似，我总想旁敲侧击地指出这些事儿。在这些我想指出的事儿当中，有一件，是我们一开始就有一些极端重要的机密。我们已经得到了许多关于炸弹和铀的研究成果，这炸弹是怎么工作的，等等。所有这些东西都写在文件里，放在木头文件柜里，柜上锁着普通的小锁。当然，有好些东西都是车间里造的，比方说，一个可以放下来的铁杆儿，然后用一把锁把它扣住，但搞来搞去不过是一把锁。再说，不必把锁弄开，你也可以把东西拿出来。你只要把柜子向后倾斜就办得到。下层的抽屉里有一根小铁杆儿，指望用它来把文件拢在一起，但在下面的木头之间，有一道又长又宽的缝隙。你可以从下边把文件拖出来。

因此，我总是把锁打开，指出这很容易办到。每次我们全体开会的时候，我都站起来说，我们有非常重要的机密，我们不应该把它们放在这种玩意儿里，我们需要好一点儿的锁。一天，特勒（Teller）33在会上站起来，他对我说："我没把我最重要的机密放在我的文件柜里，我把它保存在我的写字台的抽屉里。那该好些吧？"

我说："我不知道。我还没见过你的写字台呢。"

他靠前坐着，我坐得很靠后。会议还在继续，我溜了出去，去见识一下他的写字台。

我甚至不需要把抽屉上的锁打开。结果是这样：如果你把手从下边把手伸进去，你可以像从圈儿上扯卫生纸那样把文件拿出来。你拖出一份儿，它又连着另一份儿，它再连着另外一份儿——我把这破抽屉弄个精光，把全部东西都放在一边，回到了楼上。

会快完了，大家都往外走，我走进人群里，跑过去扯住特勒，说："哦，让我顺便看看你的写字台。"

"没问题。"他说，让我看他的写字台。

我看了看，说："看起来蛮不错。让我看看你藏了些什么宝贝。"

“我很高兴给你展览展览。”他说，把钥匙插进去，打开抽屉。“如果，”他说，“你没看过的话。”

跟像特勒这样有高度智力的人恶作剧，有个麻烦：从他琢磨出好像有什么事儿不对劲儿，到他明白了真正发生了什么事儿之间，时间太短，你都来不及乐一下儿！

我在洛斯阿拉莫斯遇到的一些特别的麻烦，特别有趣。其中的一件事，是和田纳西州的“橡树岭实验室”的安全问题有关。洛斯阿拉莫斯在准备制造原子弹，但是橡树岭却在想办法分离铀的同位素——铀238和铀235（会爆炸的那种）。他们才刚刚从实验中提取了一丁点儿铀235，一边儿还要熟悉其中的化学原理。他们将要建造一个大厂子，生产出大桶大桶的东西，然后他们要把提炼过的东西再次提炼，好为下一阶段的工作做好准备。（你不得不经过好几个阶段来提炼它。）因此，他们一方面要熟悉程序，另一方面用一个实验设备提取了一丁点儿铀235。他们在努力学习怎么对它进行化验，搞清楚那东西里有多少铀235。尽管我们把技术指南发给了他们，但他们还是理解不透。

因此，最后埃米利奥·塞格雷（Emil Segrè）[34]说，把事情搞妥，唯一可能的办法，是他下去看看他们在捣鼓什么。军队里的人说：“不行，我们的政策，不允许把洛斯阿拉莫斯的任何情报传到别的地方。”

橡树岭的人不知道铀235要派什么用处；他们只知道努力埋头干他们的活儿。我的意思是，高层的人知道他们在分离铀，但他们不知道那种炸弹有多么厉害，也不知道它是个什么道理。下边儿的人完全不理解自己在干什么。军队希望的，就是这样。没有什么信息交流。但塞格雷竭力强调他们做不好化验，整个事情要泡汤的。因此，他到底是下去了，看他们在捣鼓什么。他在厂子里走的时候，看见他们用手推车在运大桶的水，绿色的水——那是硝酸铀溶液。

他说：“啊啊，等到这东西再次提炼之后，你们也这么推来推去？你们准备这么个搞法？”

他们说：“那是——不行吗？”

“不会爆炸吗？”他说。

啊！爆炸？

于是，军队里的人说：“你看！我们什么也不该让他们知道！现在可好，他们都慌了神儿了。”

需要多少原料才够造炸弹，军方原来已经知道了——怎么也得20千克——他们也知道，这么多提炼好的原料，怎么也不会放在厂子里，因此不会有什么危险。但他们不知道的是，虽然中子在水里的运动速度会慢下来，但其效力会大大增加。在水里，它发生反应放出辐射所需要的

原料，不到十分之一——不，不到百分之一。它会把周围的人和其他什么都杀死。它十分危险，而他们对安全问题完全漫不经心。

因此，一封电报从奥本海默那儿发给了塞格雷："对整个工厂进行检查。根据他们设计的工作程序，注意材料集中在什么地方。我们同时要计算出，多少材料集中在一起，才不会发生爆炸。"

两个小组为此展开工作。克里斯蒂小组调查水溶液，我的小组调查装在箱子里的干粉。我们在计算可以把多少原料集中在一起，才安全。克里斯蒂打算到橡树岭，把情况告诉他们，因为整个事情要失去控制了，我们必须去告诉他们。因此我高高兴兴地把全部数据交给了克里斯蒂，说，"东西齐了，去吧。"克里斯蒂得了肺炎，必须得我去了。

我以前从来没坐飞机旅行。他们把机密放在一个小玩意儿里，绑在我背上！在那年头儿，飞机就跟公共汽车似的，只是站与站之间的距离要大些。遇到站，得落下来，停在那儿等人上来。

站在我后面的那家伙，手里甩着个链子，说了这么一种意思："这些日子，没优先权想坐飞机，难透了。"

他说得没错儿。我说："哦，我不知道。我有优先权。"

过了一会儿，他又忍不住了："要来些将军。他们会把咱们挤到三等舱。"

"没关系，"我说，"我在二等舱。"

他多半会给他的众议员写信——如果他自己不是众议员的话，他说："在战争期间，他们干嘛让这些小毛孩子到处乱转悠，还坐二等舱？"

无论如何，我是到了橡树岭。我让他们做的头一件事，是带我去工厂。我什么也不说，只是什么都看。我发现，情况比克里斯蒂的报告还糟糕，因为他注意到一个房间里摞着许多箱子，但没注意到在隔壁房间里，挨着同一面墙，还摞着许多箱子——以及诸如此类的事情。如果你把过多的原料放在一块儿，砰的一声，你明白吗？

我走遍了整个工厂。我记性很差，但我高强度工作的时候，短期记忆还不错。所以我记得从90到207号楼，以及多少多少号桶等各种各样的发疯的事情。

当晚我回到房间，把整个事情理了一遍，对他们解释，危险在哪儿，应该怎么补救。事情很简单。你把镉加在溶液里，把水里的中子吸收掉。按照规定，把箱子分开放置，别放得太密集。

第二天，要开个很大的会。我忘了说一件事儿：我离开洛斯阿拉莫

斯之前，奥本海默对我说：“听着，在橡树岭那边，如下人员是懂技术的：朱利安·韦伯（Julian Webb）先生、什么什么先生、什么什么先生。我希望你一定让这些人来开会，告诉他们，事情怎么办才安全，那样他们才真能听得明白。”

我说：“如果他们不能到会，那怎么办？我该怎么办？”

他说：“那你就说：洛斯阿拉莫斯方面将不为橡树岭工厂的安全问题负责，除非……”

我说：“你的意思是，小小的费曼，到那儿去，对他们说……？”

他说：“是的，小小的费曼，你去，就这么办。”

我长得实在太快了！

等我到会场的时候，果不出所料，我想见到的公司里的大腕儿、技术人员，都在。将军们，还有那些对这个非常严重的问题感兴趣的人，都在。这很好，因为，如果没人注意这个问题的话，这工厂会炸上天。

那儿有个赞姆沃尔特（Zumwalt）中尉，负责照顾我。他告诉我，少校说我不应该告诉他们中子是怎么工作的，也不要说任何细节，因为我们是想把东西分开，因此只告诉他们怎么保障安全，就行了。

我说：“照我看，除非他们理解它是怎么工作的，要他们遵守一大堆规则，那是不可能的。照我看，只有我告诉他们，他们才能知道怎么工作，洛斯阿拉莫斯方面将不为橡树岭工厂的安全问题负责，除非他们完全知道它是怎么工作的！”

这感觉不错。中尉把我领到上校那儿，对他重复了一遍我的看法。上校说：“给我5分钟。”然后他走到窗口儿那儿，站在那儿思考。这是他们很拿手的事儿——决策。关于原子弹工作原理的信息，应该不应该传达到橡树岭的工厂这问题，必须，而且也能够在5分钟内得到决定，我觉得这很了不起。我因此对军队里的这些家伙们肃然起敬，因为要是让我来决定任何重大的事儿，无论给我多长时间，我也决定不了。

5分钟之后，他说：“好吧，费曼先生，照你说的办吧。”

我坐下来，我把中子的事儿都告诉了他们，中子是怎么工作的，这个这个，那个那个，太多的中子都凑一块儿了，你们一定得把原料分开放啊，用镉吸收啊，噼里啪啦讲了一通——在洛斯阿拉莫斯，这都是些基础的东西，他们可是闻所未闻，因此在他们看来，我跟个大天才似的。

结果，他们决定成立许多小组，自己计算，学习怎么弄。他们开始重新设计厂房，而且工厂的设计师在场，建筑设计师、机械师、化学工

程师，都在忙活新工厂怎么把原料分开。

他们告诉我，过几个月再来。等工程师们完成了工厂的设计的时候，我就又来了。现在，我该看看工厂了。

这工厂还没盖呢，你怎么看啊？我不知道。赞姆沃尔特中尉，老在我周围转悠，因为我在哪儿，都得有人跟着。他带我到一个屋子里，里头有两个工程师，和一张好长好长好长的桌子，上头放着一堆图纸，告诉拟建的工厂每层楼是什么样子。

我在学校里学过机械制图，但我不太会识图。于是他们就把那一堆图纸铺开，开始为我解释，以为我是个天才。在这个厂房中，他们应该避免的事情之一，是不要把原料堆积起来。他们有些麻烦，比方说，有干燥器在工作的地方，干燥器就趋向于把过多的原料积累起来；如果阀门卡住了什么的，过多的原料就积聚起来，那就爆炸。于是他们对我解释说，这个厂房设计成这样：如果有一个阀门把原料卡住了，什么事儿也不会发生。每个地方都需要两个阀门。

接着，他们解释这是怎么工作的。四氯化碳从这儿进来，硝酸铀从这儿进到这儿，它往上，再往下，它穿过地板上了楼，通过管道上来，是从二楼上来的，啪啦啪啦啪啦——一张一张地翻图纸，下去上来，下去上来，说得很快，解释这个非常非常非常复杂的化学工厂。

我整个晕了。更糟糕的是，我不知道图纸上的符号是什么意思！有个什么玩意儿，我开始还以为是窗户呢。那是小方框儿，中间打个叉儿，到处都画这鬼东西。我以为是窗户，但不是啊，不可能是窗户，因为它不总在边儿上。我想问他们那是什么东西。

想必你也曾经处境如此尴尬：后悔你不早问。不懂就问，早没事儿了。可现在，人家都讲了那么一大堆了。你也犹豫了老长时间。要是你现在才问，他们会说："你浪费我这么长时间，什么意思啊？"

我可该怎么办啊？我有了个主意。那或许是个阀门。我伸出一根儿手指头，把它压在第三页图纸中间的那个神秘的小叉儿上，说，"如果这个阀门给卡住了，那会怎么样？"——我心里盘算着他们会说，"那不是个阀门，先生，是个窗户。"

于是，两个人面面相觑，说，"那个，如果那个阀门卡住了——"在图纸上，一个人上上下下地比画，另一个人上上下下、前前后后地比画，他俩都看着对方。他们转过来，看着我，张着口，像受了惊吓的鱼，说，"您完全正确，先生。"

于是，他们把图纸卷起来，离开了，我们也走了出来。赞姆沃尔特先生，一直跟着我，说："您是个天才。您在厂子里走一趟，第二天早晨就能跟他们讲90到207号楼里C　21干燥器的事儿，我当时就知道您是个天才，"他说，"您做得简直令人难以置信，我想知道，您怎么办到的？"

我告诉他，搞清楚那玩意儿是不是个阀门，就行了。

我处理的另外一个问题是这样：我们不得不用玛珍（Marchant）计算机来进行大量计算。顺便插一句，让你对洛斯阿拉莫斯有个印象：这些玛珍计算机是手摇的，上头有许多数码儿。你拿手摇它，它就加减乘除什么的，但不像如今那么容易。它是机械的玩意儿，经常在关键时候掉链子，那就必须得送回工厂修理。我们有几个人把计算机的外壳儿卸掉了。（我们不该这么干的。上头有警告写得明白："如果把外壳拆除，我们便不负责……"）我们把外壳卸掉，就学会了怎么修它；因为修的部位越精细，我们就越来越熟悉它。我们遇到太复杂的问题的时候，就把它送回厂子。但容易修的，我们自己修，活儿也不耽误。结果，所有的计算机都由我来修，可车间里有个负责维修打字机的家伙。

无论如何，我们看得很准，那个大问题——就是精确地计算出原子弹爆炸时是个什么情况，就是说，你得精确地计算出有多少能量释放出来这类事儿——这需要很多计算，多得我们招架不过来。有个叫斯坦利·弗兰克（Stanley Frankel）的聪明伙计，意识到这事儿用IBM的机器或许能办得了。IBM有些商用机器，名叫制表机的加法机器。还有个乘法机，你可以把卡片放进去，它就能把一张卡上的两个数乘起来。还有校对机和分类机什么的。

弗兰克就琢磨出了一个很妙的方案。如果我们在一个房间里摆的这种机器足够多，我们转着圈儿地往机器里放卡片。搞计数的人都很清楚我说的是什么，但这在当初还是新生事物——用机器进行的大规模生产。我们在加法机上干过这样的事。你通常是一口气把一个步骤计算完，事儿都是你一个人做的。但这个方案有所不同——你先去用加法机，然后用乘法机，然后用加法机，等等。弗兰克因此就设计了这么一个系统，从IBM公司订了许多机器，因为我们意识到，这是个解决问题的好办法。

我们需要有个人来修理这些机器，别让这些机器停摆。军队总是把他们的一个人派来，而他总是姗姗来迟。现在，我们的活儿总是急的。我们做的每一样儿事儿，我们都得尽快地干。在这种特别的情况下，我们把打算让机器干的所有计算步骤都搞出来了——乘以这个，然后干这个，然后除以那个。我们把程序搞出来了，可没有机器来试验。于是，我们腾了一个屋子，弄了些女孩儿在里面。每个女孩儿都有一台玛珍：一个管乘法，另一个管加法。这一位是算立方——她只管把索引卡上的数的立方算出来，然后传给下一个女孩儿。

我们如此这般转圈儿地试验，最后把这个过程中的一些小瑕疵都去掉了。结果证明，其速度要比老方式，即每个人单独完成所有的计算步骤，快多了。我们这个系统的速度，赶得上IBM机器的设计速度。唯一的不同，是IBM机器不知疲倦，不用三班儿倒。可我们的女孩儿，过一阵子，都累倒了。

不管怎么样，我们把程序的毛病都克服了，最后机器到了，可维修工没到。这是那个时代技术最复杂的机器，都是些大家伙，得拆卸了，一块儿一块儿地运来，许多许多电线，还有图纸告诉你怎么做。斯坦利·弗兰克、我和另外一个伙计，我们自己动手，把机器组装起来，但我们遇到了麻烦。最大的麻烦，是那些大腕儿们总是过来说，“要把东西搞坏的啊！”

我们把机器装起来了，有的时候，它运行正常，有的时候组装错了，不转了。最后我捣鼓乘法机，我看到它里面有个零件弯曲了，但我不敢把它弄直，因为它可能啪地一下子断了——人家一直对我说，我非得弄出点儿不可挽回的事儿不可。到修理工来了的时候，他把我们还没组装好的机器装了起来，一切正常。但那台让我遇到麻烦的机器，他也觉得麻烦。三天之后，他仍然在跟这最后的一台机器忙活。

我凑过去，说：“哎，我发现那个玩意儿弯了。”

他说：“啊，可不是嘛，都是它惹的祸！”扳直了！一切正常了。这么说是它惹的祸啊。

哈，弗兰克先生，发起这个方案的，就是这主儿，得了计算机病，如今玩儿计算机的人，都知道这种病。这病很严重，会完全妨碍正经事儿。和计算机有关的麻烦，是你和它玩儿。计算机可太妙了。按钮都你掌握着——你按这个，它就是个偶数，你按那个，它就是个奇数——如果你聪明，用这么一台机器，过不了多久，你就能干越来越老道的事儿。

过了一阵子，整个系统崩溃了。弗兰克心不在焉，没监督着大家。系统运行得很慢很慢——此时此刻，他却坐在另一个屋子里，琢磨怎么让一台制表机自动打印出角度X的反正切，那样机器就开始运行，打印纵表，然后，吱，吱，吱，一边打印，一边通过积分计算把反正切值计算出来。一次运行，就弄出一整套反正切表来。

绝对是吃饱了撑的。我们有反正切表嘛。但是，只要你曾经用计算机工作过，你就理解这种病——它能让你看看自己有多大能耐，这是一乐子！但他是第一个得这病的人，这个作茧自缚的可怜家伙。

领导要我把在小组里的工作放下，接管IBM小组。我竭力避免染上那种病。尽管在9个月里只解决了3个问题，但我这个小组还是很不错的。

真正的麻烦，是没人告诉这些伙计任何事情。军队从全国选了他们这帮人来，说是来做所谓“特遣工程”的事儿——都是些有工程能力的高中生。他们被派到洛斯阿拉莫斯来，住在兵营里，不知道要干什么。

然后他们来工作了，他们用IBM机器工作——打孔儿，那是些他们不知何物的数字。没人告诉他们那是什么。事情做得很慢。我说，头一

件应该做的事儿，是让这些懂技术的家伙，知道自己在干什么。奥本海默去跟安全部门谈了谈，得到了特别许可，这样我才去讲了很好的一堂课，告诉他们，我们在干什么。他们欢呼雀跃："我们在打仗啊！我们明白那是什么！"他们知道了那些数字是什么意思。如果计算出的压力高，那就意味着释放出的能量大，等等。他们知道了自己在干什么。

他们整个变了！他们开始发明一些办法把事情做得更好。他们改善了程序。他们打夜班。在晚上也不必有人监督他们，他们什么也不需要。他们什么都理解，他们发明了我们需要的好几种程序。

因此，我的小伙子们出息了，只需要告诉他们那是什么，就成了。结果，尽管他们以前花费了9个月解决了3个问题，现在我们用3个月解决了9个问题，几乎快了10倍。

但我们解决问题的秘密方式之一，是这样：一捆儿卡片，都得走一圈儿。首先是加法，然后是乘法——这样，它得在这屋子里经过一圈儿机器，很慢的，因为它老这么转来转去。于是我们琢磨出了一个办法，把另一套不同颜色的卡片也加到转圈儿计算中，但时间和前一套不一致。我们一次就可以解决两三个问题。

但这让我们有了另外一个麻烦。比方说，接近战争结束的时候，就在我们在阿尔伯克基试爆之前，来了问题：释放的能量有多少？我们已经计算过好几种设计不同的炸弹的能量释放，但还没计算过最终用来试爆的这一种。因此，鲍勃·克里斯蒂来跟我们说："我们在1个月之内，想知道这东西炸起来有什么结果"——这么说吧，很短的时间，比方说3个星期。

我说："不可能。"

他说："什么呀，你们1个月解决了2个问题。每个问题，只需要2个星期，或者3个星期。"

我说："我知道。解决问题，实际上需要更长的时间，但我们是平行地解决问题。整个过程，需要很长的时间，没办法更快了。"

他出去了，我开始想。有没有办法让它转得更快？没有别的事情来占着机器，没别的事情来打岔儿，办得到吗？我在黑板上写了"我们办得到吗？"向小伙子们挑战。他们全喊起来，"办得到，我们干两班儿，我们加班加点。"都这么个说法。"办了！办了！"

有了规定：别的问题都放下。只有一个问题，全力以赴解决这一个。于是他们开始投入工作。

我妻子阿琳（Arlene）患了肺结核——病得确实厉害。好像任何时候都会出事儿，因此我提前做了准备，借了宿舍里的一个朋友的汽车，以便到时候好紧急赶往阿尔伯克基。他名叫克劳斯·富克斯（Klaus

Fuchs）[35]。他是个间谍，用他的汽车把原子弹机密从洛斯阿拉莫斯送到了圣达菲（Santa Fe）[36]。但当时没人知道这个。

阿琳病危的时刻来临了。我借了富克斯的车，捎带了两个搭便车的，以免这车在往阿尔伯克基的路上出问题。不出所料，我们一到圣达菲，就爆了胎。那两个家伙帮我换胎，正当我们准备离开圣达菲的时候，另一个轮子又爆了。我们就把车推到了附近的一家加油站。

加油站的家伙在修另一个人的车，我们得等上一阵子，才能轮到他来帮我们的忙。我甚至不想说什么，倒是那两个搭便车的，到加油站那里跟他说明了情况。我们很快就有了一个新轮胎（但没有备用的了——在战时，轮胎很难搞到）。

大约离阿尔伯克基30英里（约48.3千米）的地方，第三个轮子瘪了。我就把车扔在路上，搭便车走完余下的路。我给一家修车行打了电话，让他们过来把车弄走，与此同时，我去了医院看我妻子。

我赶到之后才几小时，阿琳死了。一个护士进来填写死亡证明书，又出去了。我和我妻子多待了一会儿。我看了看我7年前送给她的那个钟，那时她刚刚得了肺结核。在那年头儿，这算是个好东西：那是个用数码显示的电子钟。随着机械部分的运转，数码会变化。这钟很娇气，经常因为这样那样的原因停摆——我必须时不时地修修它——但在那些年月中，我没让它停过。现在，它又停了——停在9：22，死亡证明书上写的就是这个时间！

我记得，有一次我在麻省理工学院兄弟会的房子里，冷不丁地，脑子里出现了一个想法：我祖母死了。接着就来了电话，事儿是这种事儿，却是打给皮特·伯内斯（Pete Bernays）的——我的祖母还活着。我记得这事儿，万一这电话就是打给我的呢？我琢磨着，这种事儿，有时候碰巧会发生——我祖母毕竟也是风烛残年了——尽管大家或许相信，这种事儿的发生，是某种超自然的现象。

阿琳在生病期间，一直把这钟放在她的床头柜上。现在，它停在她死去的那一刻。有的人，对这种事情的可能性，将信将疑，没有善于怀疑的头脑——尤其身在那样的情势之下——一时搞不明白发生了什么事，是会这样解释的：没人动过那个钟，把它解释成寻常现象，是不可能的。我很能理解他们这种想法。但钟不过是停了而已。这就成了那些匪夷所思的现象的一个很有戏剧性的例证。

我看到房间里光线很暗，我记得当时那个护士把钟拿起来，转到灯光这边儿，看钟面好看得清楚些。这就很容易把钟弄停。

我到外边走走。或许我在自欺欺人，但让我惊讶的是，我没有人们在这种情况下该有的那种感觉。我没有高兴，但也没觉得特别难过，这或许是因为，7年来，我已经知道这事儿是免不了的了。

我不知道我如何面对我在洛斯阿拉莫斯的朋友们。我不希望大家拉长着脸跟我谈这事儿。当我返回的时候（在路上又爆了一个胎），他们都来问我发生了什么事儿。

“她死了。工作进行得怎么样？”

他们立刻明白了，我不想为此终日哀伤。

（我显然为自己做了一些安慰心理的事：现实是重要的——我一定要理解，从生理学上说，阿琳究竟是怎么了。我没哭，直到几个月之后。当时我在橡树岭，我正走过一家百货商店的橱窗，里头挂着女式服装，我想阿琳或许喜欢其中的一件。此时此刻，我不胜悲戚。）

等我回去进行计算工作时，我发现那里一团糟。有白色的卡，有蓝色的卡，有黄色的卡，我开始说：“没人要你们解决另外的问题——只有一个问题嘛！”他们说，“出去，出去，出去。少安毋躁——我们会把一切解释清楚。”

那我就少安毋躁，事情是这样的：当卡片在里面走的时候，这机器有时会出错儿，或者他们也可能把卡片塞错了。在发生这样的事情时，我们以前通常的搞法，是返回去，从头儿再来。但他们注意到，在一圈儿计算的某一点上发生的一个错误，仅仅影响附近的几个数，下一圈儿也影响附近的几个数，如此等等。它是论每包卡片计算的。如果你有50张卡，你在39号卡那儿出了个错误，它会影响37号、38号、39号卡。下一圈儿受影响的，是36号、37号、38号、39号和40号卡。下一次，这错误就像一种传染病那样蔓延开来。

他们往回走一段儿，发现了一个错误，于是就得到一个主意。他们只计算那个错误周围的一小沓卡片。因为往机器里塞10张卡，要比塞50张的一沓卡，快得多，所以他们在继续计算那传播疾病的50张卡的同时，快速地计算10张卡的那一沓。因为10张卡的那一沓计算得很快，他们就把它封起来，并纠正它的错误。好聪明啊。

这帮家伙干得如此神速，靠的就是这办法。假如他们停下来从头再来，我们就损失了时间。我不一定能想出这法子啊。他们却在做这不一定的事儿。

当然，正当他们在忙活的时候，发生了个事儿。他们在蓝色的那沓卡里发现了一个错误。于是他们弄了张数少一些的黄色的一沓卡；这黄的一沓比蓝的一沓走得快。正当他们为此疯魔的时候——因为在他们把这个弄好了之后，他们不得不去纠正那一沓白卡里的错误——我这当老板的踱了进来。

“别来烦我们。”他们说。我不去烦他们了，一切都搞妥了。我们及时解决了问题。事儿就是这么办成的。

起初我是个小卒子。过了一阵子，我当了小组长。我见到了一些大人物。见到那些魅力四射的物理学家，是我一生中最棒的经历之一。

其中当然有恩里科·费米[37]。他曾经从芝加哥来了一趟，稍微问了问情况。如果我们有问题，他就帮我们。我们曾经和他开了个会，我一直在搞计算，也取得了一些结果。那些计算太精细了，非常难。在这方面，我通常是专家；我总是能告诉你结果会是怎么个样子；在我得到结果的时候，我也能解释为什么会有这么个结果。但是，现在的事情太复杂，结果为什么是那个样子，我解释不了了。

因此，我告诉费米我正在解决这么一个问题，开始解释那些结果。他说："等一下儿，在你告诉我结果之前，让我想想。结果会是这个样子（他说对了），结果之所以会是这个样子，那是因为这个这个那个那个。这太明显了，我们可以这样解释……"

他这一招儿，本该是我的拿手好戏，可他比我强十倍。真是山外有山啊。

接着是约翰·冯·诺伊曼[38]，大数学家。我们通常在星期天一起散步。我们在峡谷里走，贝特（Be-the）和鲍勃·巴舍尔（Bob Bacher）也经常入伙儿。那真是一乐子。冯·诺伊曼给了我一个很有意思的想法：你不必为你身在其中的这个世界负责。由于冯·诺伊曼的这个建议，我形成了对社会的强烈的不负责任感。这使我从此以后成了一个很快乐的人。是冯·诺伊曼播下了这颗种子，这种子在我的思想里长成了活跃的不负责任感！

我还见到了尼尔斯·玻尔[39]。他那时名叫尼古拉斯·贝克（Nicholas Baker），他是和他儿子吉米·贝克（Jim Baker），实际上叫亚奇·玻尔（Aage Bohr），一起来到洛斯阿拉莫斯的。他们是从丹麦来的，父子俩都是非常著名的物理学家，这个你都知道。即使对那些大腕的家伙来说，玻尔也是一尊大神。

我们一起开过会，他第一次来的时候，人人都想一睹伟大的玻尔的风采。因此那儿人很多，当时我们在讨论原子弹的问题。我坐在后边不知哪个角落里。他来也匆匆，去也匆匆，我只能从大家脑袋之间的缝隙看他。

在他第二次来的那天早晨，我接到了个电话。

"喂——费曼吗？"

"是我。"

"我是吉米·贝克，"是他儿子，"我父亲和我想跟你说说话儿。"

"和我？我是费曼。我只是个……"

“好了好了。八点可以吗？”

因此，在早晨八点，在大家醒来之前，我去了那地方。我们进了技术区的一个办公室，他说：“我们一直在考虑怎么让这炸弹更有威力，我们考虑的是下面这个看法。”

我说：“不成，那不管用。那没威力……咿哩哇啦，咿哩哇啦。”

于是他说：“如此这般，怎么样？”

我说：“那听上去好那么一点儿，但透着点儿蠢劲儿。”

就这么谈了大约两个钟头，来来往往地说了很多想法，还发生了争论呢。伟大的玻尔，不断拿火点他的烟斗，烟斗总是灭。他讲话的方式，不大好懂，嘟嘟囔囔，嘟嘟囔囔，很难听明白。他儿子，我听得比较清楚。

“好吧，”他最后点着烟斗说，“现在，我猜我们可以把那些大腕儿们招呼来了。”于是他们把别的家伙们都叫来了，和他们讨论。

后来，他儿子把事情的来龙去脉告诉了我。上次他来的时候，玻尔对他儿子说，“还记得坐在后边那个小家伙叫什么名字吗？就他这么一个家伙，不怕我。我想法走火入魔的时候，他敢直言。因此，下次咱们想讨论的时候，不能和那些张口闭口是的、是的玻尔博士的家伙们说了。把那小子找来，咱们先跟他聊聊。”

我总是这么傻乎乎的。我从来不知道自己在跟谁讲话。我总是为物理学操心。如果那个想法看起来糟糕，我就说它看起来糟糕。如果它看起来好，我就说它看起来好。我不会拐弯抹角。

我总像这样过日子。这很好，很快乐——但愿你也能这么办。在我的一生中，我很幸运，可以这么办。

我们把计算搞出来了，下一件事儿，当然，就是试爆。那个时候，我实际上在家里休了一个很短的假期，那是在我妻子去世不久，传来消息说：“小宝宝在哪天哪天要降生了。”

我飞了回去，我到的时候，大巴刚刚要开，所以我就直接去了现场。我们在那儿等着，在20英里（约32.2千米）开外。我们有个收音机，他们该告诉我们这东西什么时候爆炸之类的，可收音机坏了，因此我们根本不知道下面会发生什么事儿。但是，就在它应该爆炸的前几分钟，收音机好了，那边儿告诉我们还有20来秒，这是对我们这些站在远处的人而言的。另一些人，靠得比较近，在6英里（约9.7千米）的地方。

大家发了墨镜，好戴着墨镜看。墨镜啊！20英里之外，透过墨镜，

你什么玩意儿也看不到。我琢磨着，真对你眼有害的（亮光怎么也伤不了眼），只有紫外线。我坐在一辆卡车的挡风玻璃的后边儿，因为紫外线穿不透玻璃，这该安全吧，这样我才好看那个鬼东西。

时候到了，那边儿一团巨大的闪光，晃得我猫下腰去，我却在卡车的底板上看到一片紫色。我说："不对劲儿。这是视觉残留的余像。"我于是抬起头，看到白光变成了黄的，又变成了橘红的。云朵形成又消散——这是冲击波压缩和膨胀的结果。

最后，一个橘红的大球，中心明亮异常，它变成了一个橘红的球，开始升腾，稍作汹涌状，边缘稍微黑了一点儿，然后你看到它成了一个闪闪发光的大烟团，内部的火突突窜出，还有热。

这一切持续了大约1分钟。那是一个由明到暗的序列，我都看见了。或许我是看清楚了这鬼东西的唯一的一个人——第一次"三合一"试爆。别人都戴着墨镜，6英里处的人，什么也没看到，因为他们按照指示趴在地上。我多半是用肉眼看它的唯一的家伙。

最后，大约一分半钟，突然，一声巨响——嘣，然后作隆隆之声，犹如滚雷一般——这声音让我心里有底儿了。在这整个过程中，没人说一句话。我们只是默默地看。但这声音，让大家如释重负——特别让我如释重负，因为，这声音，从那么远传来，厚实，这意味着事儿，真的成了。

站在我旁边的那人，说："那什么玩意儿？"

我说："那就是那炸弹了。"

那人是威廉·劳伦斯（William Laurence）。他在那儿，是为了写一篇文章来讲述整个情况。我本是负责带他到各处看的。后来发现，事情对他来说，太技术性了，因此后来来了个史密斯（H.D.Smyth）我就带他到处看。我们做过的一件事，是我们到了一个房间，在一个窄窄的基座的顶上，有一个镀银的小球儿。你可以把手放在这球儿上。它热乎乎的，它有放射性，它是钚。我们站在这房间的门口儿，在谈论它。这是一种人造的新元素，在地球上是前所未有的，或许它只在地球刚形成的时候，存在了非常短暂的一段时间。此时此地，它被分离了出来，有放射性等性质。我们把它造出来了，因此，它是个无价之宝。

与此同时，你知道大家在谈话的时候，都是个什么德行——浑身乱动什么的。他在踢那个制门器，我说，你明白吧，"没错儿，这制门器和这门可真是太般配了。"这个制门器是个直径10英寸（约25.4厘米）的黄灿灿的金属半球儿——金的，真的。

话得从头儿说起：我们需要做一个实验，看看不同的材料能把多少中子反射回来，这为的是节约中子，那样我们就不必用掉那么多材料了。我们试过许多不同的材料。我们试过白金，我们试过锌，我们试过

黄铜，我们试过金。因此，在用金做实验的时候，我们有了一些碎金子。某人出了这么个聪明的点子，用这个大金球当存放钚的那房间的制门器。

这玩意儿爆炸了以后，洛斯阿拉莫斯一片兴奋。大家都在聚会，我们到处乱跑。我还坐在吉普车后座打鼓什么的。只有一个人，鲍勃·威尔逊，坐在那儿，闷闷不乐。

我说："怎么闷闷不乐的呀？"

他说："那是个可怕的东西，我们造的。"

我说："这可是你挑头儿的。你把我们大伙儿都扯了进来。"

你瞧：我都干了什么——这其余的人都干了什么——我们很有理由，就动手干了，然后你卖劲儿干活儿，弄成了一个东西，这很快乐，很刺激。你知道，你停止思想了；你就是停止思想了嘛。此时此刻，只有鲍勃·威尔逊一个人，还在那儿思考这事儿。

此后不久，我返回了文明世界，到康奈尔大学教书。我的第一感觉很奇怪。我不理解那种感觉，但当时是很强烈的。我坐在纽约的一家饭店里，比方说，看着窗外的建筑物，开始想，你知道，广岛原子弹的破坏半径有多大，等等……第34大街离这儿多远？……所有那些建筑物，全部夷为平地——等等。我一边儿走，一边儿看有人在造大桥，或者在铺新路，我想，他们都疯了，他们就是不明白，他们不明白啊。我们为什么要造新东西？都在瞎忙活。

但幸运的是，这种瞎忙活的日子，已经过去了将近40年，不是吗？因此，说造大桥是瞎忙活，可见是错了；别人有勇往直前的勇气，我很欣慰。

撬锁贼碰到了撬锁贼

我跟一个名叫列奥·拉法特里（Leo Lavatelli）的家伙学会了开锁。我发现，一般的旋转弹簧锁——如耶鲁锁——容易开。你把螺丝刀插在锁眼儿里（你得贴着一边儿往里插，好让锁眼儿留出空隙），试着转动。这么转，是转不动的，因为里头有一些栓子，一定得把栓子抬到一定的高度（用钥匙）。因为锁造得不那么地道，因此经常只有一个栓子在吃力，其他栓子不起作用。现在，如果你把一段铁丝儿——或许是一个曲别针儿，头儿上有个小凸起的最好——插进去，然后再在锁里前后哆嗦着，你最后就能把那个吃大部分力的栓子，撬到合适的高度。锁就松动了，但只松动了一点儿，第一根栓子在上面待着，卡在边儿上。现在，大部分的力，是第二根栓子吃着，你再花几分钟重复刚才这个随意的过程，直到把全部的栓子都拉起来。

经常发生的事儿，是螺丝刀打滑，你听到吱啦、吱啦、吱啦，这让你急得发疯。在钥匙拔出来的时候，有一些小弹簧就把栓子推到下边儿了；把螺丝刀一拔出来，你就听得见栓子啪啦一下掉下去了。（有时你故意把螺丝刀拔出来，为的是看看你插的地方对不对——比方说，你可能插错地方了。）这过程有点儿像西西弗斯（Sisyphus）[40]：你总是从山顶上滚下来。

过程是简单的，熟才能生巧。你得学会怎么紧紧把东西压住——压得足够紧，栓子才会待在那儿，但也不能太紧，否则栓子就不往上走了。大家经常把自己锁了起来，把锁打开不那么难，而大多数人其实都不知道这个。

在我们开始在洛斯阿拉莫斯搞原子弹项目的时候，一切都是匆匆上马，实际上没准备好。这项目的全部机密——所有和原子弹有关的东西——都放在文件柜里。要是文件柜锁了的话，也是用的挂锁，这种锁或许只有三个栓子：开这种锁，跟掰开饼似的容易。

为了加强保密工作，车间为每个文件柜加了一根挺长的铁棍儿，把抽屉把手串起来，再用挂锁绊住铁棍儿。

有个家伙对我说："瞧车间弄出的这个新生事物——现在你能把柜子打开吗？"

我看了看柜子背面，看到抽屉底儿不结实。每个抽屉上都有了狭缝，狭缝里有一根铁棍儿，铁棍儿绊着一个可以滑动的板儿（它在抽屉里边儿把文件拢住）。我从后边儿把手伸进去，把那个板儿往后推，然后从狭缝往外扯文件。"瞧！"我说，"连锁都不用撬。"

在洛斯阿拉莫斯，大家都很合作，我们觉得指出应该得到改善的事儿，是我们的责任。我一直在发牢骚，说文件不安全，可别人都认为那很安全，因为有钢棍儿，有挂锁，可那顶个什么用啊。

为了证明那些锁不顶用，每当我需要一个人的报告而他又不在旁边的话，我就径直到他们的办公室，打开文件柜，把东西拿走。我把事情做完了，就把东西还给那个家伙："谢谢你的报告。"

"你从哪儿弄的？"

"从你文件柜里拿的。"

"但我把它锁了啊！"

"我知道你锁了。锁不顶用。"

终于来了一些文件柜，装了"莫斯勒锁业公司"造的密码锁。柜子上有三个抽屉。把最上边儿的抽屉拉开，挂钩就开了，另外两个抽屉也就

跟着开了。最上边儿的那个抽屉是这么开的：按照密码，转动密码轮儿，往左，往右，再往左，然后往右转到10，这就把里边的一个闩挑开了。整个文件柜是这么关的：首先关上底下的两个抽屉，然后关最上边儿的那个抽屉，转动密码轮儿离开10，这就把那个闩扣上了。

自然，这种新文件柜立刻成了我的挑战。我喜欢难题。一个家伙搞出个东西，来为难另一个家伙。可是，道高一尺，魔高一丈！

我必须得首先理解这种锁是怎么工作的，所以我就把我办公室的那个拆了。它工作的道理是这样的：一根杆儿上有三个圆盘，一个挨着一个，每一个圆盘都在不同的地方有凹槽。这个想法，是把三个凹槽排成一条线，这样，当你把密码轮儿转到10的时候，一点点摩擦力会把那个闩带进由那三个圆盘组成的狭缝里。

现在，转动三个圆盘，就有一个栓子从密码轮的后面伸出来，还有一个同样半径的栓子是从第一个圆盘上竖起来的。把密码轮转一圈儿，你就会把第一个圆盘带起来。

第一个圆盘背后有一个栓子，其半径和第二个圆盘前边的那个栓子的半径一样，因此，等到你把密码轮扭到第二圈的时候，你也把第二个圆盘带起来了。

继续转动密码轮，第二个圆盘背后的栓子，会连动第三个圆盘前面的那个栓子，现在你就把第三个圆盘弄到了跟密码轮的第一个数字相符合的合适位置上了。

现在，你必须向相反的方向转动密码轮一整圈儿，以便从另一边儿连动第二个圆盘，然后继续按照密码轮的第二个数字转动。以便把第二个圆盘弄到合适的位置上。

你再次反转方向，把第一个圆盘弄到合适的位置上，现在，三个凹槽在一条直线上，把密码轮转到10，柜子开了。

我折腾了一番，没有进展。我买了两本开锁的书，都是大同小异的。书开头儿，讲关于这位开锁匠非凡业绩的几个故事，比方说，一个女人把自己锁在了藏肉的冰箱里，打不开了，快要冻死了，这位开锁的，把自己倒挂在房梁上，两分钟就把它打开了。或者海底下有一些装着昂贵的皮毛和金条的锁了的箱子，他潜到水下，把箱子打开了。

书的第二部分，告诉你怎么开保险柜。书里有各种各样的傻里傻气的东西，比方说“把某个日子当密码试试，或许是个好主意，因为许多人喜欢把日期当密码”，或者“考虑一下保险柜主人的心理，他可能把什么数字当作密码”，以及“秘书常常担心把保险柜的密码忘了，所以她或许把密码写在如下这些地方——写字台的边儿上、通讯录里……”等等。

怎么打开一般的保险柜，这些书确实告诉了我某些有意思的东西，

而且也很容易理解。一般的保险柜，有一个多余的把手，因此，如果在你转动密码轮的时候，往下压那个把手，事情就不公平了（对锁不公平）。把手上的力，试图把闩推到凹槽里（并没有排成一条线），而一个圆盘受的力会比另外一个多。当那个圆盘上凹槽走到闩的下面的时候，会有一声轻微的啪啦声，用听诊器是可以听到的，或者你手上可以感觉到摩擦力增加了一点儿（要感到摩擦力，你不必用砂纸来擦你的指尖儿），你知道，“找到一个数码了！”

你不知道那是第一、第二还是第三个数码。但是，你很可以猜得出是哪一个，只要你看看你需要反转密码轮多少次才又能听到那声啪啦就行了。如果不需要转一圈儿，那就是第一个圆盘；如果少于两圈儿，那就是第二个圆盘（你必须根据栓子的粗细做相应的矫正）。

这一有用的手法，只能对付有把手的一般的保险柜，所以我又没辙了。

我在文件柜上把各种各样的辅助手段都试过了，诸如不打开顶上那个抽屉，把前面的螺丝钉卸掉一个，然后插进一段儿晒衣服用的铁丝，想把下面的两个抽屉的插销弄开。

我试过快速转动密码轮，然后转到10，这样会增加一点儿摩擦力，我指望这会使一个圆盘以某种方式停住。我把什么东西都试过了。我都急眼了。

我还进行了不少系统的研究。比方说，一种典型的密码组合是69-32-21。在你想把保险柜打开的时候，密码允许多大的误差？假如密码是69，那么68也管用吗？67也管用吗？就我们的这种特别的锁而言，答案是：68和67都管用，但66不管用。在两个方向上，允许的误差都是2。这意味着，每五个数码，你就得试其中的一个，所以你可以试0、5、10、15，等等。在一个有100个刻度的密码轮上，就有20个这样的数码，这样就有8000种可能的数码组合；如果你想试遍全部数码的话，那么就有100万种可能的数码组合。

现在的问题是，试完8000种数码组合，要花我多长时间？假定我们已经得到了我想得到的前两个正确的数码组合，比方说，是69-32。但是我并不知道，我得到的数码组合是70-30。我可以试20种可能的第三个数码组合，而不必每次都确定前两个数码组合。现在，假定只有第三个数码组合是对的。在第三个圆盘上把20个数码试完了之后，我就稍微转动一下第二个圆盘，然后在第三个圆盘上试另外20个数码。

我一直在我自己的保险柜上练习，所以我能以我最快的速度进行这个过程，而且脑子不乱，不会忘记该试的数码到了哪一个，从而把前一个数码搞乱。就像练习变戏法似的，我在试数码的时候，绝对有节奏，不到半小时，就能试遍后面的400个可能的数码组合。这意味着我最多只需要8小时开一个保险柜——平均4小时开一个。

洛斯阿拉莫斯还有另一个家伙，叫斯塔雷（Stal-ey），也对锁感兴趣。我们时不时地谈开锁的事儿，但没谈出个什么。等我琢磨出怎么在平均4小时内打开保险柜的时候，我想向斯塔雷显示一番这是怎么弄的，所以我走进计算部的一个家伙的办公室，问道："用一下你的保险柜，介意吗？我想让斯塔雷长点儿见识。"

与此同时，计算部的几个家伙过来看热闹，一个家伙说："嗨，各位，费曼想让斯塔雷见识见识怎么开保险柜，哈、哈、哈！"我本来没真的打算开保险柜，我只是想向斯塔雷显示怎么快速地试后两个数码，却又不会忘记试到哪儿了，以至于不得不再确定第一个数码。

演示开始。"让我们假定第一个数码是40，我们把15作为第二数字来试。我们往前和往后转到刻度10；再往后多转5个刻度，再往前转到刻度10；如此这般。现在，我们已经试过了可能的第三个数码。现在，我们把20当作第二个数码来试；我们往后转到刻度10，往前转到刻度10；再往后多转5个刻度，往前转到刻度10；往后再转5个刻度，往前。"咔嚓！我下巴都掉下来了：第一和第二个数码碰巧对了！

没人看到我什么表情，因为我背对着他们。斯塔雷看来吃惊不小，但我们俩都很快知道是怎么回事儿，于是我兴高采烈地把顶上的抽屉拉了出来，说："搞定了！"

斯塔雷说："我看明白了你什么意思。这办法非常棒"——我们俩迈步出门。大家都傻了眼。那纯粹是瞎猫碰到了死耗子。但我确实名声大噪，我会开保险柜。

花了我大约一年半的时间，我才有这造诣（当然，我也在搞原子弹！）。我觉得我已经把保险柜打败了，这意思是说，如果确实真出了麻烦——如果有人失踪了或者死了，没其他人知道密码，但我们急着要文件柜里的东西——我是能把它打开的。在读过了开锁匠书里的那些华而不实的东西之后，我觉得我这一次堪称壮举。

我们在洛斯阿拉莫斯没什么娱乐，我们得为自己找点儿乐子，因此摆弄我文件柜上莫斯勒的锁，成了我的一项娱乐活动。有一天，我观察到了一个有趣儿的事儿：当锁开着的时候，抽屉也拉出来了，密码轮停在刻度10（人在打开文件柜往外拿文件的时候，就是这么干的），锁闩还扣着呢。锁闩还扣着，这什么意思？这意思是：锁闩仍然在排成一条直线的三个圆盘形成的凹槽里啊。哇！

现在，假如我把密码轮稍微转离刻度10，锁闩就从凹槽里抬起来了；如果我们立刻返回刻度10，锁闩就又掉进了凹槽，因为我还没把凹槽搞乱。如果我分五步转动密码轮离开刻度10，那么到某一个刻度，即使我再返回刻度10，锁闩也不会掉在凹槽里了：凹槽已经搞乱了。紧前面那个数，即仍然允许锁闩掉到凹槽的那个数，就是密码组合的最后一组数！

我意识到，我可以依照此法发现第二组数：一旦我知道了最后一组数，我就可以朝另一个方向，还是分五步，一点一点地转第二个圆盘，直转到锁闩掉下去，而紧前面那个数就是第二组数码。

如果我很有耐心，我会把三组数都这样搞出来，但用那种很细致的办法弄到第一组数码组合需要的劳动，要比在文件柜关着的时候并且在你已经知道后两组数码的前提下去试那20个可能的第一组数码所需要的劳动多得多。

我练啊练啊，练到我连密码轮都不怎么看，就能从开着的文件柜上搞到后两组数码。然后，等我在某个家伙的办公室里讨论物理问题的时候，我就倚着他打开的文件柜，就跟人在谈话的时候，漫不经心地摆弄钥匙似的。我不过是在前前后后、来来回回地扭密码轮而已。有时我用手指头去摸锁闩，所以我也不需要看看它是不是从凹槽里出来了。用这种办法，我搞来了好些文件柜的后两组数码。我回到自己的办公室，就把这些数字写在一张纸上，藏在我的文件柜的锁里。每次我要看那张纸的时候，都要把锁拆开——我觉得把它藏在这地方，是安全的。

过了一阵子，我的名声传扬开了，因为下面这种事儿是会发生的，有人会说："费曼，克里斯蒂出城了，我们需要他保险柜里的一份文件——你可以打开吗？"

如果我知道我没有那个保险柜的后两组数码，我就敷衍道："抱歉，可我眼下腾不出身啊，我得把这个工作做完。"如果我有那两组数，我就说："好的，可我得去找工具。"我不需要什么工具，但我要回我办公室，把我的文件柜打开，把那张纸拿出来："克里斯蒂——35，60。"然后，我带着把螺丝刀，到克里斯蒂办公室里，顺手把门带上。很明显，不是每个人都可以看我是怎么弄的！

我一个人待在那儿，几分钟就把保险柜打开了。我要干的，仅仅是最多需要20分钟搞到第一组数码，然后坐下来看杂志什么的。让人看出这事儿很容易办，那又何必，有人会琢磨出这其中必定有窍门！过一阵子，我开了门，说，"开了。"

大家以为我能把保险柜弄打开，每次都要摸索。我能把锁打开，是碰巧了，让他们那样想好了，那都是因为和斯塔雷的那次偶然的事儿。没人琢磨出我把他们保险柜的后两组数码搞了去，尽管我一直这么搞，或许正是因为我一直这么搞，他们才不知道，就像一个靠玩扑克骗钱的骗子一样，走哪儿都带着一副扑克。

我经常到橡树岭检查铀工厂的保密工作。一切都是匆匆上马，因为那是战时。有一次，我非得在周末去不可。那是个星期天，我们在那个家伙的办公室里——一个将军，一个头儿，或者某个公司的副总裁，几个大人物什么的，还有我。我们聚在那儿讨论一份报告，这报告在这家伙的保险柜里——一个机密保险柜——他那时突然意识到他不知道密

码。知道密码的，只有他秘书一个人，于是他给她家里打电话，结果她到山上野餐去了。

正当这么折腾着的时候，我说：“要是我来摆弄一下这保险柜，你不介意吧？”

“哈、哈、哈——一点也不介意！”我就走到保险柜那儿，开始捣鼓。

他们开始商量，从哪儿弄辆车去找找那个秘书。那家伙越来越尴尬，因为他让大家在这儿空等，他是这么一头蠢驴，连自己的保险柜都打不开。在场的每个人都烦了，都跟他急眼，正在此时，啪啦！——保险柜开了。

在10分钟之内，我就把这个装着和工厂有关的全部机密文件的保险柜给打开了。他们目瞪口呆。这保险柜显然不怎么保险啊。这可是沉重的打击啊：所有这些“只可阅读、不可带走”的东西，这些绝密文件，锁在这么一个美妙的机密柜里，而这个家伙，10分钟就把它打开了！

我当然能把这个保险柜打开，因为我搞走人家保险柜的后两组密码，都成了习惯。在我在前一个月来橡树岭的时候，我来过这个办公室，其时这个保险柜开着呢，我呢，就漫不经心地把它的两组数码弄出来了——我总在操演我的这个嗜好。尽管我没把数码写下来，但我还能模模糊糊地记得。第一次，我试了40-15，然后试了15-40，但这都不管用。然后我试了10-45，和可能的第一组数码一起试，于是就打开了。

在另一个周末，还是在橡树岭，发生了一件相似的事儿。我写好了一份报告，这报告必须让一个上校认可，而报告放在他的保险柜里。这里的每个人都把文件放在像洛斯阿拉莫斯那样的文件柜里，但他是个上校啊，所以他的柜子别致得多：两扇门，装了两个把手，把手把四个3/4英寸（1英寸＝2.54厘米）粗的钢制锁闩从构架上拉了回来。大黄铜门晃开了，他把我的报告拿出来读。

我还没有机会见识一下这么好的保险柜呢。我对他说：“在你读报告的时候，我看看你的保险柜，介意吗？”

“随你看。”他说，确信我做不了什么事儿。我看了看一扇厚重的黄铜门的背后，发现那个密码轮儿连着一个小锁儿，这小锁儿就跟我在洛斯阿拉莫斯的文件柜上的那个小部件儿一模一样。同一个公司，同样的小闩子，不同的仅仅是：这里的锁闩下来的时候，保险柜上的大把手能把一些钢棍拨到侧路上，而且借助一串杠杆，你可以把那些3/4英寸粗的钢棍拉回原处。这整个的杠杆系统，依靠的仍然是把我的文件柜锁住的那样一些小闩子。

仅仅是出于职业完美主义的原因，为了确定这个保险柜实在没什么两样，我把它的两组密码弄到手了，方法和我从其他文件柜上搞密码一

样。

与此同时，他在那里读报告呢。读完了，他说，“行，不错。”他把文件放在保险柜里，抓着那两大把手，把两扇大黄铜门晃上。关门的声音，铿然悦耳，但我知道那全是心理战术，因为它除了是同样的破锁之外，什么也不是。

我禁不住想挑拨挑拨他（我对军队里的家伙总有看法，瞧这身神气活现的军装），我就说：“从你关这保险柜的派头儿来看，我猜，你觉得东西放那儿，挺安全。”

“那还用说。”

“你觉得东西放那儿挺安全，唯一的理由，是因为老百姓把那玩意儿叫作‘保险’柜。”（我在这节骨眼儿上用了“老百姓”这词儿，听起来好像他已经被老百姓愚弄了似的。）

他非常恼火。“什么意思啊，你——它不保险？”

“开锁的好手，30分钟就弄开它。”

“你能30分钟把它弄开吗？”

“我说的是开锁好手嘛。我来开，大约需要45分钟。”

“也罢！”他说，“我老婆在家等我吃晚饭来着，可我打算待在这儿看看热闹。你给我坐那儿，弄那倒霉玩意儿弄上45分钟，要是弄不开的话！”他坐在他的大皮椅子上，把脚翘在写字台上，看起报纸来。

我信心十足，拉了把椅子，坐在保险柜前头。我开始随机转动密码轮儿，这是故作姿态而已。

约莫5分钟之后，当你坐着等的时候，5分钟显得好长，他有点儿不耐烦了，“我说，进展如何？”

“对付这么个东西，开就彻底开了，否则就是开不了。”

我琢磨着，再过一两分钟，也就差不多了，于是我就真用心地开它，两分钟之后，啪啦——开了。

上校的下巴掉下来了，眼珠子爆出来了。

“上校，”我说，语气严肃，“让我跟你说点儿这些锁的事儿。在保险柜的门敞着的时候，或者顶上的那个抽屉拉开的时候，把密码弄到手，易如反掌。就在你读报告的时候，我正弄这事儿呢，仅仅是为了表明这种危险。你应该坚决要求大家在工作的时候，把抽屉锁上，因为抽屉敞着，这柜子真是不，堪，一，击呀。”

“哦！我明白你什么意思。这事儿好玩儿哈！”从此，我们站在了同一立场上。

下次我到橡树岭的时候，那儿的秘书，那儿的人，知道我是何许人也，老对我说：“别打这儿过！别打这儿过！”

原来，上校已经给工厂的每个人发了通知，通知说：“在费曼先生上次来访期间，在任何时间，他是否进过你的办公室，是否靠近过你的办公室，或者是否穿过你的办公室？”有些人说是，另一些说否。那些说是的，又得到了个通知：“请更改你保险柜的密码。”

那就是他的解决方案：我成了危险。因此，由于我，他们全体都不得不更改密码。更改密码，再记住新密码，这事儿真是可恼啊，因此他们全体都跟我急了眼了，不想让我靠近他们：他们或许还得再次更换密码。当然，在他们工作的时候，抽屉仍然敞着！

洛斯阿拉莫斯有个图书馆，藏着我们工作的全部文件：那里有一个坚固的水泥房间，有一扇漂亮的大门，门上有个能转的轮子——跟银行金库似的。在战争期间，我曾想凑近看看。我认识在那儿当图书馆员的那个女孩儿，我求她让我玩玩儿那门。我对这门着了迷：它是我见过的最大的锁！我发现，我要想进去，用搞到两组密码的那老办法，不灵了。在门敞着的时候，我一扭把手，实际上是把锁锁上了，锁头伸出来了，没办法再把门关上，偏得等那女孩儿来再打开锁才成。我就此罢手，不再玩儿那锁了。我没工夫琢磨这锁是怎么工作的，它大大超过了我的本事。

在战后的那个夏天，我有一些文件要写，有些工作要扫尾，所以我从康奈尔大学回到了洛斯阿拉莫斯（那年我在康奈尔大学教书）。我工作到中间，必须得引用我以前写的一个文件，但我记不得了。那文件就在那个图书馆里。

我到那儿去找那个文件，那儿有个当兵的，走来走去的，还有枪呢。那是个星期六。在战后，这图书馆星期六不开门。

于是我记起了我那么要好的一个朋友，弗里德里克·德·霍夫曼（Fredericde　Hoffman）做的事儿。他是“解密部”的。战争之后，军队考虑着把某些文件解密，他不得不来来回回跑那个图书馆——看看这个文件，看看那个文件，检查这个，检查那个——简直快要发疯！他于是就把每一份文件——关于原子弹的全部文件——都拷贝了，放在他办公室里的九个文件柜里。

我到了他办公室，灯亮着呢。看来那儿有人——或许是他的秘书——刚出去几分钟，于是我就等。我一边等，一边开始捣鼓一个文件柜上的密码轮儿。（插一句，我不知道德·霍夫曼文件柜后两组密码。这些文件柜是在战后、在我离开后送来的。）

我开始玩儿其中的一个密码轮儿，开始想那几本开锁的书。我心里想，“我从来没把书里写的那些招数放在眼里，因此我也没试过，那就让我试试，照书上的点子，看我能不能打开霍夫曼的保险柜。”

第一招儿，秘书：她担心把密码忘了，就把密码写在什么地方。我开始踅摸书里提到的几个地方。写字台抽屉锁着，但那锁是列奥·拉法特里教我开的那种普通锁——啪的一声就开了！我看了抽屉边儿：什么没有。

然后，我翻看秘书的文件。我找到了一张纸，所有秘书都有这种纸，整整齐齐地写着希腊字母——以便她们能在数学公式里能认出这些字母——还注了音。就在那儿，沿着纸的上缘，漫不经心地写着π＝3.14159。好了，六位数，那么为什么秘书必须得知道圆周率的数值呢？明摆着的，没别的理由！

我走到文件柜那儿，试第一个：31-41-59，没开。然后，我试59-41-31，也不灵。然后，95-14-13。往前，往后，头朝下，这么摆，那么放——都不管用！

我把写字台抽屉关了，走到门外，又想到了开锁的书：其次，试试心理法。我对自己说：“弗里德里克·德·霍夫曼，铁定是那种用数学常数当保险柜密码的家伙。”

我回到第一个文件柜那里，试27-18-28——啪啦！开了啊！（在重要性上仅次于圆周率的数学常数，是自然对数的底，e：2.71828……）有九个文件柜，我已经把第一个开了，但我要的文件不在里面——柜子是按制作者名字的字母顺序排的。我试着开第二个柜子：27-18-28，啪啦！密码相同，也开了。我想，“妙哉！我已经打开了关于原子弹的机密文件，但是，如果我在将来要讲这故事的话，那我一定得拿得准全部密码真的一个样儿！”有几个文件柜在下一个房间里，于是我就在其中的一个柜子上试27-18-28，开了。现在，我已经开了三个保险柜——密码全是一样。

我心里想：“现在，我现在可以写一本开锁的书了，管保打遍天下无敌手，因为，在开头儿，我会讲我是怎么打开那些内容更牛、更有价值的保险柜的，任何地方的任何开锁匠开过的保险柜，里头的东西都没办法跟这个比——柜子里关的是人，就另当别论了——但比毛皮或者金砖厉害。我把他们都比下去了，我开的保险柜，装着和原子弹有关的全部机密：钚的生产程序，纯化工序，需要多少材料，原子弹是怎么工作的，中子是怎么发生的，原子弹是怎么设计的，尺寸是多大——洛斯阿拉莫斯那地方所知道的全部情报：一应俱全！”

我返回第二个文件柜，拿出了我需要的那份文件。然后，我拿了一支红铅笔，在办公室里到处都是那种黄纸片儿上写道，“借用编号LA4312文件一份——撬锁贼费曼。”我把这纸片儿放在一摞文件顶上，

把柜门关上。

然后，我到我打开的第一个柜子那儿，写了另一张纸条儿："这个柜子也并不比另一个难开——聪明的家伙"，把柜子关上了。

然后，在另一个房间里的另一个柜子里，我写道："要是密码全都一样，那就全都容易开——同一个家伙。"我也把这个柜子关了。我返回我的办公室，写我的报告。

那天晚上，我去了咖啡馆儿吃晚饭。弗里德里克·德·霍夫曼在那儿。他说他要到办公室去工作，所以我就跟他去了，仅仅是为了好玩儿。

他开始工作了，不一会儿他就到了另一个房间去开那里的一个文件柜——这事儿，我倒没想到——他先开的柜子，碰巧是我放第三张纸条儿的那个。他开了抽屉，看到了那个异物——那个黄灿灿的纸条儿，上头还用鲜红的铅笔涂鸦了什么玩意儿。

我在书上看到过，说是受了惊吓的人，脸会变成菜色，但我以前还没见识过。敢情，绝对是真的。他脸发灰了，接着变成了一种绿色——他那样子，真是可怕。他拿着这个纸片儿，手在哆嗦，"看，看，看这是什么啊！"他说，浑身筛糠。

纸条儿上说："要是密码全都一样，那就全都容易开——同一个家伙。"

"这是个什么意思啊？"我说。

"我保险柜的密，密啊，密码，全是一，一，一样的！"他连话都说不成个儿了。

"那可不是个好主意哦。"

"现，现在我，我知道了。"他说，抖作一团。

血液从脸上流走的另外一个效果，一定是脑子不灵。"他还签了名，还签了名啊！"他说。

"什么？"（我名字没在这张上面啊。）

"没错儿，"他说，"和那个一直企图闯入欧米伽大楼（Omega Building）的家伙，是同一个人！"

在整个战争期间，甚至在战后，总有传言说："有人一直企图闯入欧米伽大楼！"你知道，在战争期间，他们为了原子弹在做实验，想得到足够的材料，以便把材料聚拢起来发生连锁反应。他们把一块儿材料，扔到另一块儿上，让它从另一块儿中间穿过，当它穿过去的时候，反应就会发生，他们就测量得到了多少中子。那一块材料从另一块材料中间落

得太快，因此没什么东西能够聚集起来，也不会爆炸。但，他们需要足够强烈的反应，那样他们才能知道事情真的以正确的方式发生了，才能知道一切都按预期的那样进行——这实验太危险！

他们自然不会在洛斯阿拉莫斯镇中心做这个实验，而是在好几英里（1英里＝1.61千米）开外、翻过好几个台地的一个峡谷里，一切都封锁了。这座欧米伽大楼也围着栅栏，还有岗楼呢。在夜半时分万籁俱寂的时候，兔子会从草丛中窜出来，闯到栅栏上，弄出一些动静来。卫兵开枪。执勤的中尉走过来了。卫兵能怎么说——不过是只兔子？那不成。“有人一直企图闯进欧米伽大楼，我把他吓跑了！”

所以呢，德·霍夫曼面如死灰、浑身发抖，他没意识到他的逻辑里有漏洞：那个一直企图闯进欧米伽大楼的家伙，和站在他身边的这个家伙，究竟是不是同一个家伙，这事儿还不清楚呢。

他问我，这该如何是好。

“得，看看少没少文件。”

“看样子没事儿，”他说，“我看不出少了什么。”

我设法把他领到我从里面取了文件的那个柜子那儿。“哦，对了，如果全部密码是相同的，备不住他会从另外一个抽屉里拿点儿什么。”

“是啊！”他说，他回到自己的办公室，把第一个文件柜打开，发现了我写的第二个条子：“这个柜子也并不比另一个难开——聪明的家伙。”

到那时候，作孽的究竟是“同一个家伙”还是“聪明的家伙”，并无区别：他完全明白，就是那个一直企图闯进欧米伽大楼的家伙。因此，要说服他把我放第一张纸条儿的那个文件柜打开，还真费劲。我记不得我说了什么，把他说动了。

他打开那柜子，于是我就往门厅那儿溜，因为我有点儿害怕了。等他发现是谁给他搞的这一套，他会割断我喉咙！

不出所料，他把我追到了门厅。他倒没发怒，却是实实在在地搂住了我，因为他心里完完全全地一块儿石头落了地：原子弹机密失窃，不过是我的一场恶作剧啊。

几天后，德·霍夫曼告诉我，他需要从克斯特的保险柜里取个东西。唐纳德·克斯特（Donald Kerst）回伊利诺伊州去了，很难找到他。“如果你用心理方法能打开我全部的保险柜，”德·霍夫曼说（我已经告诉过他我是怎么弄的），“或许你也能这样把克斯特的保险柜弄开。”

到那个时候，这故事已经到处传扬了，因此好几个人都过来看热

闹，看我打开克斯特的保险柜的这一匪夷所思的过程——我对这柜子是陌生的。没必要避着人了。我没有克斯特保险柜的后两组密码；要运用心理方法，我需要周围认识克斯特的人。

我们大家都到了克斯特的办公室，我检查了抽屉，希望能发现线索：什么也没有。然后，我问他们，“克斯特会用哪种密码——数学常数吗？”

“啊，不！”德·霍夫曼说，“克斯特干的事儿，非常简单。”

我试了10-20-30，20-40-60，60-40-20，30-20-10。不灵。

然后，我说：“你们觉得他会用什么日期吗？”

“没错儿！”他们说，“他这种家伙，就是用日期的主儿。”

我们试了若干日期：8-6-45，原子弹爆炸的日子；86-19-45；这个日期，那个日期；原子弹项目的启动日期。什么也不管用。

到这个时候，大多数人都溜了。他们没耐心看我捣鼓这一套，但解决这类事儿，唯一的办法就是耐心！

然后，我决定把大约1900年以来到现在所有特别的日期都试一遍。这听起来不容易，但没多少，第一组数是月份，1到12，我只试3个数，10、5和0。第二组数是日，1到31，我可以试其中的6个数。第三组数是年，到当时只有47个数，我可以试其中的9个数。因此，8000个可能的密码被缩减为162个，我在15到20分钟之内就可以试完。

幸运的是，我是从12月份这头儿开始的，因为到最后我把柜子打开的时候，密码是0-5-35。

我转过头问德·霍夫曼：“1935年1月5号前后，对克斯特有什么特别的？”

“他女儿是在1936年出生的，”德·霍夫曼说，“那想必是她的出生日了。”

现在，我已经把两个陌生的保险柜打开了。我越发老练了。现在，我到专业水平了。

还是战争结束后的那个夏天，资产部的那个家伙，打算把政府买的一些东西收回去，再当剩余物资卖掉。其中有一件是上尉的保险柜。我们都认识这个保险柜。这位上尉，是在战争期间来的，断定那些文件柜对他将要搞到的那些机密文件是不够安全的，因此他必须得要一个特别的保险柜。

我们的办公室都在一些稀松的木头楼里，上尉的办公室在一个木头

楼的二楼上，他订购的那个保险柜是个钢造的、很重的保险柜。工人不得不先搞了木头底座，再用特别的起重机把它弄上台阶。因为我们没什么娱乐活动，大家都在看热闹，看这个大保险柜，费那么大劲，移往他的办公室，大伙儿都在开玩笑，说他会把什么机密藏在这个保险柜里啊。有个伙计说，倒不如把我们的东西放在他的保险柜里，让他把他的东西放在我们的保险柜里。因此，大家都知道这个保险柜。

资产部这主儿，想把它卖掉，但首先得把里头的东西拿出来。知道密码的人，那位上尉是一个，可他在比基尼（Bikini）41；阿尔瓦雷茨（Alvarez）42也知道，可他忘了。那主儿就求我打开这个保险柜。

我到了他办公室，对那个秘书说："为什么不给那个上尉打个电话，问他密码啊？"

"我不想打扰他。"她说。

"哦，你倒要打扰我打扰8个钟头。除非你打打电话，否则本人不伺候。"

"行啊，行啊！"她说，她拿起电话，我进了另一个房间，看那个保险柜。就是这玩意儿，那个巨大的、钢制的保险柜，它的门大开着呢。

我回到秘书那儿，"开了。"

"神了啊！"她一边放电话，一边说。

"没什么神的，"我说，"本来就是开着的。"

"哦！我猜呀，资产部毕竟也能把它打开。"

我跑到资产部找那主儿。"我去看了那柜，本来就开着嘛。"

"啊，对，"他说，"抱歉我忘告诉你了。我们把我们的固定锁匠叫到那儿，打算钻开它。但在开钻之前，他想试试能不能打开，他把它开了。"

原来如此！第一项情报：洛斯阿拉莫斯现在有固定锁匠啊。第二项情报：这人知道怎么钻保险柜，我对此倒一无所知。第三项情报：他能打开陌生的保险柜——在几分钟之内。这是个货真价实的职业选手，一个货真价实的情报来源啊。这家伙，我得会会。

我发现他是个锁匠，战后他们雇了他来处理这种事儿（战后他们不怎么担心安全问题了）。原来他没多少开锁的活儿，所以他也修理我们用过的那些计算器。在战争期间，我一直在修那些玩意儿——所以我有门路去会会他。

我去见人，从来不会鬼鬼祟祟、拐弯抹角的。我径直走过去，自我

介绍。但目前这档子事儿，会会这主儿是很重要的。我也知道，我要是不向他显显本事，他是不会告诉我开保险柜的秘诀的。

我找到了他的房间在什么地方——在理论物理学部的地下室里，我就在那儿工作——我还知道他在晚上工作，没人在晚上用那些机器。因此，首先，我在晚上经过他门口儿到我的办公室。如此而已，我不过是打那儿走过去罢了。

几个晚上之后，都不过是“嗨”，打个招呼。过了一阵子，他认出打这儿走过的，是同一个家伙，他说“嗨”，或者“晚上好”。

这过程太慢，持续了几个星期，然后我看到他在修玛珍计算器。关于计算器，我什么也没说，还不到说话的时候。

我们之间话逐渐多了一点儿：“嗨！我看你干活儿，很卖力气的！”

“那是，很卖力气！”——如此而已。

最后，出现了一个突破：他请我喝汤。现在我们相处融洽。天天晚上我们都在一块儿喝汤。现在，我开始说了一点儿加法机的事儿，他说他遇到了个麻烦。他一直想把一组带弹簧的轮子装回到那个轴上，可他没有顺手的工具什么的，他已经为这事儿忙了一个星期了。我告诉他，在战争期间，我就是用这些机器工作的，“我会告诉你是怎么回事儿：今天晚上，你把这机器放那儿就成了，我明天瞧瞧它。”

“好。”他说，因为他已经没辙了。

第二天，我看了这个鬼东西，想用手抓着那些轮子把它们安回去。它总是啪啦一声跳回来。我心里想，“如果他试同样的办法试了都一个星期了，我也试了，可办不到，那就不是个正确的搞法！”我停下来，仔细看它，我注意到，每个轮子上都有个小洞儿——仅仅是个小洞儿。我恍然大悟：我把第一个轮子弹了上去；然后，我把一段铁丝穿在那个小洞儿里；然后，我把第二个轮子弹上去，再在它的小洞儿里穿铁丝。然后，下一个，下一个——跟往线上穿珠子相似——我试了头一次，就把整个东西装上去了，装得整整齐齐，把铁丝抽出来，一切都办妥了。

那天晚上，我让他看那个小洞儿，让他看我是怎么弄的。打那儿以后，我们谈机器谈得多了去了，我们成了好朋友。他办公室里有许多小格架，里头都是拆到一半儿的锁，还有保险柜锁的零件。哇，漂亮啊！但我仍然没提锁和保险柜的事儿。

最后，我琢磨着，日子到了，于是我决定抛出个诱饵，关于保险柜的：关于保险柜，我会告诉他一桩让他瞧得上眼的事儿——当保险柜开着的时候，你是能把它后两组密码搞到手的。“嗨！”我看着那些小格架说。“你在捣鼓莫勒斯保险柜啊。”

“是啊。”

“你知道，这些锁啊，不堪一击。如果保险柜开着，你是能把它后两组密码搞到手的……”

“你能？”他说，终于表现出一点儿兴趣来了。

“是啊。”

“让我看看怎么弄。”他说，我给他演示怎么弄，他把头转朝我。“尊姓大名？”到那时候，我们还没互相通名报姓呢。

“迪克·费曼。”我说。

“我的个老天爷！”他颇为敬畏地说。“开锁大家啊！久闻大名，如雷贯耳，真是相见恨晚啊！我想向您请教，怎么开保险柜。”

“这话儿怎么说的？你知道怎么开保险柜。”

“不知道。”

“听着，上尉的那个保险柜的事儿，我听说过。这一次，我动了这么大心思，因为我想跟你会面。你可倒好，告诉我你不知道怎么开保险柜。”

“真不会。”

“得，那你必定知道怎么钻保险柜。”

“那个我也不知道啊。”

“什么？”我叫起来。“资产部那主儿说，你带着家伙，去钻上尉的那个保险柜来着。”

“假定您是吃开锁匠这碗饭的，”他说，“一个家伙过来让你去钻个保险柜。你怎么办？”

“我嘛，”我回答，“我就装模作样地把我的家伙备齐了，带着家伙去找那保险柜。然后呢，在保险柜上随便找个地方，呜呜呜呜呜呜呜呜呜，一通乱钻，饭碗就保住了。”

“确确实实，我就这么干的。”

“但你把它开了啊！你必定知道怎么开保险柜。”

“哦，是啊。我知道那些锁，在出厂的时候，设置的密码是25-50-25或者50-25-50，我就想啦，‘谁知道，或许那家伙懒得换密码

呢。’第二个密码果然管用。”

因此，我确实从他那儿学到了东西——他开保险柜，和我用的是相同的妙法。但更好玩儿的是，那个牛气冲天的上尉，非得要一个超级保险柜，兴师动众，费那么大劲，把这玩意儿吊到他办公室，可他自己却懒得重设密码。

我一个接一个地走访我们楼里的办公室，试那两个出厂密码，五个保险柜，我就能打开一个！

山姆大叔不要你了

战争之后，军队千方百计让大伙儿去充当在德国的占领军。在那之前，军队还考虑大家身体之外的原因而准予延缓服役（我可以延缓服役，因为我为原子弹工作过），可是现在他们翻云覆雨，要每个人都首先接受体检。

那个夏天，我在纽约州斯卡奈塔第市（Sche-nectady）的“通用电器公司”（General Electric）为汉斯·贝特工作。我记得，我不得不走老远的路——我想是到奥尔巴尼（Albany）43——去体检。

我到了征兵的那地方，得填许多表格，然后我到各个不同的体检棚子去。他们在一个棚子里查视力，在另一个棚子里查听力，又在别的一个棚子里采血样，等等。

说着说着，最后你来到了第十三号棚子：精神病医生的棚子。你等在那儿，坐在长条椅上。我在那儿等的时候，可以看到他们都在干什么。有三张桌子，每张桌子后边都坐着个精神病医生。“犯人”呢，只穿着裤衩儿，坐在精神病医生对面，回答各式各样的问题。

那时，有许多讲精神病医生的电影。比方说，有一部《走火入魔》（Spellbound），里头有个女的，曾经是个伟大的钢琴家，现在呢，挓挲着双手，动弹不得，家人就找了个精神病医生来帮她的忙，那个精神病医生和她一块儿到了楼上，进了一个房间，你看到他随手把门关上了，楼下呢，一家人在吵吵会出什么事儿，然后，她从那房间里出来了，手还是那样怪可怕地挓挲着，颇为戏剧性地走下楼梯，走到钢琴那儿，坐下，把手举到琴键上，突然之间——丁丁当丁，当，当，当——她又能弹了。嚯，我受不了这些聊斋故事，我拿得准，精神病医生都是骗子，我可不和这些人打交道。因此，轮到我和那个精神病医生谈话的时候，我就这心态。

我靠桌子坐下来，那个精神病医生开始浏览我的文件。“哈喽，迪克！”他用一种挺愉快的语调儿说。“哪儿工作呀？”

我在想，“他以为自己是个什么东西，我的昵称，也好是他乱喊

的？”我呢，冷冷说道，“斯卡奈塔第。”

“哪个单位儿的呀，迪克？”精神病医生说，又挂着三分笑。

“通用电器。”

“喜欢你的工作吗，迪克？”他说，脸上仍然是腻味人的笑容。

“一般般吧。”我就是不想跟他套词儿。

三个可爱的问题，接着，第四个问题，彻底变味儿了。“你认为大家都在谈论你吗？”他问，声调儿低沉，严肃。

这我倒来了精神，说：“可不是咋的！我回家的时候，我妈经常告诉我，她是怎么怎么跟她的朋友们讲我的事儿来着。”他不听我解释，却在我的文件上写下了什么东西。

然后，又来了，声调儿低沉，严肃，他说：“你认为大家都盯着你吗？”

我刚要说不认为，他却说：“比方说，你认为那些坐在那边儿长条椅上的小伙子，现在都在盯着你吗？”

刚才我坐着等和这个精神病医生谈话的时候，我注意到长条椅上坐着大约12个家伙在等着这三个精神病医生检查，他们也没什么别的东西可看的嘛。我就用12除以3，每个医生检查4个，可我保守着点儿，所以我说：“是啊，或许他们当中有两个人在看着我们。”

他说：“那你转过头去看看”——他自己却懒得看看！

于是我就转过头去，果然，两个家伙在看。所以我就指着他们，说，“是啊——那个家伙，还有那边儿那个家伙，在看我们呢。”当我转过头的时候，那个样子拿手指着人家，其他人当然就开始看我们，所以我说，“现在，他，那边儿还有两个——现在椅子上的人都在看啊。”他仍然不抬头看看我说的对不对。他忙着在我的文件上写下了更多的东西。

然后，他说：“你在你脑袋里听到有人说话吗？”

“很少。”我正要告诉他，有那么两次，确有这样的事儿，可他说，“你自言自语吗？”

“是啊，有的时候，我在刮脸的时候，或者在想问题的时候。偶尔吧。”他又写了更多的东西。

“我知道你妻子去世了——你和她说话吗？”

这问题真把我惹恼了，但我耐住性子，说："有的时候吧，我到山上去的时候，就想她。"

他又写。然后，他问："你有没有家庭成员住在精神病院？"

"有啊，我有个姨妈，在疯人院里。"

"你为什么把那个叫作疯人院？"他说，怫然不悦。"你为什么不把那个叫作精神病院？"

"我觉得那是同一个玩意儿。"

"那你认为精神错乱是怎么回事？"他生气地说。

"那是人类的一种怪异的疾病。"我说得很真诚。

"它比盲肠炎也没什么怪异的！"他反驳。

"我不这么认为。就盲肠炎而言，我们理解它的起因，理解得好得多，理解它的机理是怎么回事儿。可说到精神错乱，事情就复杂得多，也神秘得多。"我不必在这里把这整个的辩论讲一遍。我的意思是，精神错乱在心理学上是怪异的，他却以为我是说，社会认为精神错乱是怪异的。

直到那时，尽管我对那个精神病医生一直不友好，但我说的一切，还是认真的。但是，当他要我把两只手伸出来的时候，我就忍不住要耍花招了。这个花招，是我在排队"抽血"的时候，有个家伙告诉我的。我琢磨着，没人能得着个机会玩儿这个把戏。我呢，索性破罐子破摔，我准备玩儿它一玩儿。于是，我就把两只手伸出来，一只掌心向上，一只掌心朝下。

那个精神病医生没注意到这个，他说："把手翻过来。"

我把两只手都翻过来了。掌心向上的那只，变成了掌心朝下；掌心朝下的那只，变成了掌心向上。他还是没注意到，因为他一直都在专注地看着一只手，看它是不是发抖。因此，这把戏没玩儿成。

最后，问题都问完了，他又变得友好了。他有兴致，说："我看到你有博士学位，迪克。你是在哪儿上的学？"

"麻省理工和普林斯顿。你是在哪儿上的学？"

"耶鲁和伦敦。你学的是什么，迪克？"

"物理。你学的是什么？"

"医学。"

“这是医学？”

“怎么，是啊。那你以为它是什么？你到那边去坐了，等几分钟。”

我于是又坐在长条椅上，在那儿等着的一个家伙，凑过来说：“嚯！你在那儿磨蹭了25分钟！别的家伙也就5分钟！”

“是啊。”

“嗨，”他说：“你知道怎么涮那些精神病医生吗？你只需要咬指甲就可以了，像这样。”

“那你为什么不像那样咬你的指甲？”

“哦，”他说，“我真想参军呢！”

“你想涮那几个精神病医生吗？”我说，“你只要把你刚才说的告诉他就行了。”

过了一阵子，有人把我招呼到一个不同的桌子那儿去见另外一个精神病医生。头一个精神病医生很年轻，天真无邪的样子；这一位，头发灰白，神态不凡——显然是老资格的精神病医生。我琢磨着，这一切该到了摆平的时候了，但无论会发生什么事儿，我是不打算待敬他们的。

这第二个精神病医生看了我的文件，满脸绽笑，说：“哈喽，迪克。我知道，在战争期间，你在洛斯阿拉莫斯工作。”

“没错儿。”

“以前那儿有一所男子中学，对不对？”

“对。”

“那学校里有很多建筑？”

“只有几座。”

三个问题——一个技巧——下个问题，完全变味儿了。“你说，你在你脑袋里听到人说话。请说说看。”

“这种事儿，不常见。在我很注意一个说话带外国味儿的人说话的时候，到我入睡的时候，我听见他的声音，听得很清楚。第一次发生的时候，我还在麻省理工学院念书。我听得见一个老教授法拉塔（Vallarta）说，‘则个则个电场啊。’另一次是在芝加哥，在战争期间，那时特勒教授在跟我解释那个炸弹是怎么工作的。因为我对各种各样的现象都感兴趣，我就纳闷啊，我听这些带外国口音的声音，怎么能听得这么真切，可我模仿他们却模仿得不那么好……人人都会有这样的事儿吗？”

这个精神病医生把手捂在脸上，在他的指头缝儿之间，我看到了那么一丝笑容（他不回答这个问题）。

然后呢，这个精神病医生检查了别的什么东西。“你说你和你去世的妻子说话。你对她说什么？”

我火了，我琢磨着，我说什么，关你个屁事儿，我说：“我告诉她我爱她，希望这没碍着你什么事儿！”

一来一往地互相说了几句刻薄话之后，他说：“你相信超正常现象吗？”

我说：“我不知道什么是‘超正常’现象。”

“什么？你，一个博士，学物理的，不知道什么是超正常现象？”

“不知道。”

“那就是奥利弗·洛奇（Oliver Lodge）爵士[44]和他的学派所相信的那个东西嘛。”

这不算什么提示，但这事儿，我知道。“你说的是超自然现象？”

“你愿意那么叫它，就那么叫呗。”

“那好，我愿意那么叫它。”

“你相信心灵感应吗？”

“不相信。你信吗？”

“我嘛，我总是宽容而无偏见。”

“什么？你，一个精神病医生，总是宽容而无偏见？哈！”就这么彼此较劲，折腾了好一阵子。

然后，到将近结束的时候，“你觉得生命值多少？”

“64。”

“为什么说是‘64’？”

“你要我说出个数儿来，为生命定价儿，又有什么道理？”

“不是这样！我的意思是，为什么你说‘64’，而不是‘73’，比方说？”

“如果我说了‘73’，你还不是问同样的问题！”

这个精神病医生用三个友好的问题收场，别的精神病医生也是这么做的，把我的文件递给我，我就到了下个棚子去。

在我排队等着的时候，我在看文件，上面写着到目前为止我接受的所有检查的结论。完全是为了恶作剧，我把我的文件给我后边儿的那家伙看，我用一种愚蠢的声调儿问他：“嗨！你的‘精神病科’得了什么？哦！你得了个‘N’。我别的东西都得‘N’，但‘精神病科’得了个‘D’。那什么意思啊？”我知道那什么意思：“N”是正常，“D”是有缺陷。

那家伙拍着我的肩膀说：“哥们儿，挺不错的。那说明不了什么。别为那个操心！”然后，他走到这房间的另一个角落里，吓坏了：这是个疯子啊！

我开始看那几个精神病医生写了字的文件，看起来情况颇为严重！第一个家伙写道：

以为人们谈论他。

以为别人盯他。

睡前幻听。

自言自语。

与去世的妻子谈话。

姨母在精神病院。

眼神非常怪异。（我知道这是什么意思——当我说“这是医学？”的时候，眼神确实怪异。）

第二个精神病医生显然更重要，因为他字如蟹腿，更难辨认。他写了些“确定有睡前幻听现象”之类的话。（“睡前”这个词儿，意思是你正在沉沉入睡的时候，你有幻听。）

他写了许多听起来很专业的东西，看起来颇为糟糕。我琢磨着，我一定得想想办法，得跟军队澄清这些事儿。

到整个体检结束的时候，有个军官来决定你是参军还是淘汰。比方说，如果你听觉有毛病，他来决定那是不是真严重到不能参军的程度。因为军队是不遗余力地要扩充兵员，这个军官是不会轻易放过你的。他像根儿钉子似的不肯通融。比方说，我前边的那伙计，脖子后头有两块儿骨头凸出来——脊椎移位什么的——这军官不得不从桌子后头站起来，拿手去摸那两块儿骨头——他得搞清楚那是不是真的！

我琢磨着，这是我澄清误解的地方了。轮到我的时候，我把文件递给军官，正要跟他把一切解释清楚，可这军官，头也不抬。他一眼就看

到了“精神病科”后面的那个“D”，伸手就去摸“拒收”的大印，连问题都不问，什么也不说，利利索索地在我的文件上盖了“拒收”的戳子，然后把我那4F（征兵体检不合格）的文件递给我，眼却还是盯着桌子。

所以呢，我就出去了，上了去斯卡奈塔第的公共汽车。我坐着车，琢磨刚才发生的这些荒唐事儿，不禁失笑——都笑出声了——我对自己说：“我的老天爷！要是他们看见我现在这副样子，那就更确信无疑了！”

等我最后到了斯卡奈塔第的时候，就去看汉斯·贝特。他在写字台后头坐着，他开玩笑地对我说，“怎么样，迪克，通过了？”

我拉长个脸，慢慢地摇摇头，“没通过。”

他突然很紧张，以为他们发现我有什么重病，他就以关切的口吻问我：“怎么回事儿，迪克？”

我拿手指着我脑门子。

他说：“没那么严重吧！”

“就那么严重！”

他叫起来：“没，那，么，严，重！”他笑得山响，通用电器公司的屋顶差点儿给震塌下来。

我把这故事讲给许多人听，人人都笑，但有几个例外的。

我回纽约的时候，我爸爸、妈妈和妹妹都到机场接我，坐车回家的路上，我把这故事整个讲给他们听了。末了，我妈妈说：“嗨哟，这可该怎么办啊，迈尔（Mel）？”

我爸爸说，“你别犯蠢，露西尔（Lucille）。简直是胡闹嘛！”

事儿就这样了，可后来我妹妹告诉我，等我们到家，我不在场的时候，我爸爸说，“听着，露西尔，你不该当着他的面儿说那些。现在，这可该怎么办？”

但到那个时候，我妈妈已经冷静了下来，她说：“你别犯蠢，迈尔！”

还有一个人，这故事让他闹心。事情是在“物理学会”的会议饭桌上，斯莱特（Slater）教授，就是我在麻省理工学院的老教授，说：“嗨，费曼！给我们讲讲我听过的那个征兵的故事。”

我为全体物理学家们讲了整个故事——除了斯莱特，别人我都不认识——他们从头到尾一直笑个不住，但是故事完了，一个家伙说：“呵，

那个精神病医生，或许还是有些想法的。”

我不禁问道：“你干哪行的，先生？”当然，这是个叫人摸不着头脑的问题，因为大家都是参加专业会议的物理学家。但一个物理学家会冒出这么一句，我很惊讶。

他说：“那个，呃，我本来实在不应该坐在这儿，我是受我兄弟的邀请，到这儿做客的，他是个物理学家。鄙人呢，精神病医生。”我和尚面前骂秃子，把他给骂出来了！

过了一阵子，我开始担心。他们会说，这里的这个家伙，在战争期间，一直免服兵役，因为他在造原子弹。征兵委员会一直接到信，说他是个重要人物，可他现在“精神病科”得了个“D”——结果他是个疯子！显然，他不是个疯子。他是变着法儿地让我们相信他是个疯子——我们得把他抓回来！

形势看来对我不利啊，因此我必须想个出路。几天之后，我琢磨出了个解决办法。我给征兵委员会写了封信，信是这么写的：

亲爱的先生们：

我认为我不应该去当兵，因为我在给科学学生教书。我们国家的福祉，部分地依赖于我们未来的科学家兵力强不强。然而，根据我的体检报告，也就是说，从精神病学的角度看，我是不合格的，各位或许会决定免除我的兵役。我觉得，那份报告不应该得到任何重视，因为我认为它满篇都是低级的错误。

我之所以敦请诸位注意这个错误，乃是因为我脑子太疯了，疯得都不想占这个错误的便宜。

理查德·费曼谨上

结果：“缓服兵役。征兵体检不合格。健康原因。”

第4部分　从康奈尔大学到加州工学院，接触巴西

讲派头的教授

我相信，若不教书，我就活不下去。究其原因，是我必须得干点儿事儿，那样的话，在我想不出什么东西的时候，在我没什么作为的时候，我可以对自己说：“至少我还活着；至少我也在干着什么事儿；我在做着贡献嘛”——心理安慰而已。

20世纪40年代，我在麻省理工学院的时候，亲眼看到了“高等研究所”那些伟大头脑的遭遇。那些人，大脑了不得，被特选出来，给他们机会，坐在树林边儿那座可爱的房子里，不用上课，没有任何硬派的任务。这些可怜的倒霉蛋儿，现在可以坐着，心无牵挂地思考问题了，这不很好吗？过了一阵子，他们什么也没想出来：要搞出东西，他们什么机会都有，可他们脑袋空空如也。我相信，人处于这么一种境况中，内疚或者郁闷，会跟小虫儿似的往你心里乱钻，你会为自己无所作为而心情焦虑。焦虑也白搭。

脑子空了，是因为没有足够真实的活动，没有挑战：你不跟做实验的那帮家伙接触，你不必思考怎么回答学生的问题。你什么也没有！

在任何思想过程中，都有这样一些时刻：一切都进行得顺顺利利，奇思妙想纷至沓来。教学的确扰乱精神，因此它是世界上最讨厌的事儿。然后呢，有更长一段时间，你思路断绝，惘然若失，无所事事，这会把你逼疯！你连“我在教书啊”这话都说不得。

如果你在教学，你可以思考那些你了然于心的基本的东西。这些东西是一种乐趣，爽人心神。再思再想，并无害处嘛。有没有更好的方式来介绍它们？有没有新问题与它们相关？你对它们有没有新想法？基本的东西，易于思考。如果你想不起来一个新思想，也不妨事。你以前对它们做的思考，足可应付讲课之用。如果你确实想到了某种新东西，能以新方式来看它，你心甚慰啊。

学生质疑问难，常常是新的研究之源。他们经常问一些深刻的问题，我有时也想到过那些问题，可后来可以说是暂时放弃了。重新思考这些问题，看我现在有没有更好的想法，这对我没有害处。学生们或许看不到我想回答的是什么问题，或者也看不到我想思考的那些问题的精妙之处，但他们问了一些和那个问题邻近的问题，这使我恍然而有所悟。自己面壁苦思，是不大容易悟到这些事儿的。

因此，我发现教学和学生使我生机盎然。若是有人为我制造了一个安安乐乐的条件，用不着教学，哪怕在其中为我准备了高位，我也断不

接受。永远不。

但是，曾几何时，有人真为我准备了这么个位置。

在战争期间，我还在洛斯阿拉莫斯（Los Ala-mos）的时候，汉斯·贝特（Hans Bethe）在康奈尔大学为我找了这么个活儿，年薪3700美元。另外一个地方也给了我一个位置，钱更多，但我喜欢贝特，我决定到康奈尔了，我也不挂念着钱了。但贝特对我总是照顾周到，当他发现别人给的钱多时，他就让康奈尔大学把我的薪金增加到4000美元，那时我还没上班儿呢。

康奈尔大学告诉我，我要讲的是物理学的数学方法，他们告诉我什么日子我该到——我想是11月6号。这听起来好玩儿，那时候不是一年将尽了吗？我在洛斯阿拉莫斯坐上火车到伊萨卡（Ithaca）[45]，一路上大部分时间都在写“曼哈顿计划”的最终报告。我还记得，那天晚上在火车从布法罗（Buffalo）开往伊萨卡的时候，我才开始备课。

你一定得知道洛斯阿拉莫斯的工作压力有多大。你做什么事儿，都是尽可能地快。大家干活儿都非常非常卖力气，每件事儿都是在最后一刻完成的。因此，在开课之前，在火车上用一两天时间编排好课程，在我看来很自然。

我教物理学的数学方法这课，善莫大焉。在战争期间，我做的就是这事儿——把数学运用到物理上去。我知道什么方法真有用，什么方法没用。运用数学窍门卖力干了四年，那时我已经有了很多经验。所以，我把数学中的许多题目以及教法都列了出来。我至今还留着那些教案——在火车上做的。

我在伊萨卡下了车，跟平时那样，扛着我那沉重的手提箱。一个家伙喊：“要出租车吧，先生？”

我从来不想打出租车。我年轻，囊中羞涩，我行我素。但我心里想：“我都教授了——得有派头啊。”于是我就把手提箱从肩膀上卸下来，用手提着，说：“要。”

“到哪儿？”

“旅馆。”

“哪个旅馆？”

“伊萨卡的旅馆，随便哪个。”

“预订房间了吗？”

“没呢。”

“找到个房间，不容易哦。”

“我们就挨家找。待着等我。”

我问了“伊萨卡旅馆”：没房间。我们去了“旅人旅馆”：他们也没房间。我对司机说：“带着我满城乱转，没用了，这得花不少钱。我还是拿腿挨家串旅馆吧。”我把手提箱放在旅人旅馆那儿，然后周游各处，找房间。你该看到，我做得准备有多充分，新教授啊。

我碰到了个家伙，也在到处乱转找房间。事儿明白了，找个旅馆房间，是不可能的了。过了一阵子，我们逛到了个小山包上，逐渐意识到，我们离大学校园近了。

我们看到了个房子，有点儿像寄宿馆，一扇窗敞着，你可以看到里头有些双层床。眼下是夜里，于是我们决定去问问能不能寄宿在那儿。门开了，里头连个人影儿也不见。我们进了一个房间，另外那个家伙说：“来吧，就睡这儿了！”

我觉得不合适。我觉得这跟做贼差不多。有人已经把那床铺好了，他们或许会回来，发现我们睡在他们床上，那就麻烦了。

于是我们就出去了。我们又走了几步，在路灯下，我们看到谁收拾的一大堆树叶——当时是秋天——是从草坪上耙到这儿的。我说：“嗨！我们可以钻到树叶里睡！”我试了试，松松软软的。我懒得到处走了。要是这堆树叶不是刚巧在路灯底下的话，那就尽善尽美了。但我不想上任伊始，就闹出麻烦。还在洛斯阿拉莫斯的时候，大家就拿我打趣儿，当时我在那儿又打鼓又怎么的，说是康奈尔大学这是请了个什么“教授”啊。他们说，我一定会立刻搞出点儿傻事儿而声名远播，所以我就努力讲点儿派头。打消在树叶里睡觉这念头儿，我好不情愿。

我们又瞎逛了一阵子，走到一座大房子跟前，是校园里的一个重要建筑。我们进去了，走廊里有两张睡椅。另外那家伙说：“我在这儿睡了！”说着就瘫在睡椅上。

我不想闹出麻烦，所以我在地下室里找到了看门人，问他我能不能睡在睡椅上，他说：“没问题。”

第二天早晨我醒了，找了个地方吃了早饭，然后开始到处跑，想尽快找到我上第一节课的地方。我跑进了物理系：“我第一节课在哪儿上？我晚了吗？”

那家伙说：“你没什么好担心的。8天后才开课。”

我大吃一惊！我说的头一句话是，“可好了，你为什么让我提前一个星期到这儿？”

“我还以为你愿意来熟悉熟悉呢，你得找个地方安顿下来再上课不是？”

我返回了文明世界，却不知道文明世界是个什么东西了！

吉布斯[46]教授叫我到“学生会”那儿找个地方待着。那是个大地方，许多学生在那儿乱转悠。我走到一张写着“住宿”的大桌子那儿，说：“我是新来的，我在找个房间。”

那家伙说：“哥们儿，伊萨卡的住房状况十分紧张。到底紧张到怎么个程度呢？信不信由你，昨天晚上，一个教授不得不睡在这大厅的睡椅上！”

我四下看了看，还是那个大厅啊！我转头朝他说：“那个，我就是那个教授，那个教授不想再睡大厅了！”

我最初在康奈尔大学当教授的那些日子，有趣儿，有时候，好玩儿。我到那儿几天之后，吉布斯教授来到我办公室，对我解释说，学期都这么晚了，我们通常不接学生，但有几个例外的情况，就是学生非常非常好的时候，我们也接受。他递给我一张申请表，让我看看。

他转回来问：“怎么样，你什么看法？”

“我认为他属于一流学生，我认为我们应该接受他。我认为他在这儿是我们的幸运。”

“是啊，但你看过他的照片没有？”

“看看照片，我主意就变了吗？”我叫起来。

“绝对变不了，先生！很高兴你这么说。我想看看我们的新教授是怎么一个人。”吉布斯喜欢我这种方式，有话讲在他脸上，却不为自己想想，“他是系主任啊，我初来乍到，还是出言谨慎为妙。”我没这么机灵；我的第一反应是直来直去的，我说的就是第一个冒到我脑子里的想法。

然后，另一个家伙到了我办公室。他想跟我谈谈哲学。我真记不得他说了什么，但他希望我参加什么教授俱乐部。这个俱乐部是那种反犹太俱乐部，认为纳粹不那么坏。他试图跟我解释，为什么有那么多犹太人做这个，做那个——都是些发疯的事儿。我就等他把话说完，然后对他说：“你知道，你大错特错：我就是在犹太家庭里长大的。”他出去了。我就是这么开始对康奈尔大学人文学科领域和其他几个领域的一些教授失去敬意的。

我妻子死后，生活得重新开始，我希望结交几个女孩儿。在那年头儿，交际舞很流行。因此在康奈尔大学有许多舞会，以便把大家搅和在

一块儿，特别是为了把新生和战后返校的老生搅和在一块儿。

我记得我第一次去的那个舞会。我在洛斯阿拉莫斯的时候，三四年没跳舞了，我甚至不喜欢扎堆儿。所以，我到了这个舞会，尽我所能，跳啊跳啊，我想我跳得还算说得过去。要是跟你跳舞的那些人感觉良好，你通常会知道你自己跳得还算说得过去。

在我们跳舞的时候，我会跟女孩儿说几句话。她问我几个个人问题，我也问她几个问题。但是，每当我想和那个我已经和她跳过舞的女孩儿再跳一个的时候，我就不得不到处找她。

“你还想跳吗？”

“不了，真抱歉。我得喘口气儿。”或者，“那个，我得去洗手间了”——这样那样的借口罢了，一连两三个女孩儿，都这说法！我这是怎么了？我跳得蹩脚？或者我人品蹩脚？

我又跟另外一个女孩儿跳，又来了那些别人问过的问题：“你是本科生，还是研究生？”（那时有许多老相的学生，因为他们是退役的。）

“都不是，我是个教授。”

“哟？什么教授啊？”

“理论物理。”

“敢情你还造原子弹。”

“没错儿。战时我在洛斯阿拉莫斯工作。”

她说：“骗你姑奶奶去！”——扬长而去。

这让我恍然大悟。事儿都明白了。我也把这个头脑简单的愚蠢事实告诉了所有的女孩儿，我呢，一直不知道毛病出在哪儿。我举止得体，落落大方，彬彬有礼，有问必答。可是，非常明显的是，女孩儿一个跟着一个把我晒到了一边儿。一切看来都称心如意，可是嗖的一下子——事不谐矣。幸运的是，这女的让我“骗我姑奶奶去”，我这才如梦方醒。

所以呢，以后我就避开那些问题，效果却相反了：“是新生吧？”

“那个，不是。”

“那就研究生啦？”

“不是。”

“那你是什么呀？”

“我不想说。”

“干嘛不想告诉我你是个什么人呢？”

“我不想……”——她们还是一个劲儿跟我说话！

末了，我带了两个女孩儿到我住处来，其中一个告诉我说，作为新生，真的不必觉得不自在。像我这岁数才开始上大学的，大有人在啊，这实在没什么不合适的。她们是大二的，跟母亲一样知道疼人，两个都是这样。她们很是体谅我的心理，但我不想把事情搞得这么走样儿，不想有这么多误会，所以我让她们知道我是个教授。我愚弄了人家半天，芳心大为不悦。在康奈尔大学当个年轻的教授，麻烦多了去了。

长话短说，我的物理学的数学方法开课了，我认为我也许还教了另一门课——电学和磁学。我也想做研究。在战前，我在读学位的时候，我有的是想法：我发明了一些新方法，用路线积分来做量子力学，我想做的事儿，多着呢。

在康奈尔大学，我得备课，我还要经常跑图书馆去看《天方夜谭》，捎带着向从旁边走过的女孩儿抛媚眼。但是，到了做研究的时候，我工作不了了之。我有点儿累，提不起兴趣了，我搞不了研究了！我觉得这情形持续了好几年。可我回头算算那有多长时间的时候，觉得不可能有那么长时间啊。也许如今我不会觉得那时间很长，但人在当时，那好像持续了很长时间。我干脆不能开始思考任何问题了：我记得我写关于伽马射线的一个问题，写了一两行，就写不下去了。我相信，由于战争，还有别的事儿（我妻子的死），我是把自己烧干了。

现在，我比较能看得明白这种情况。首先，一个年轻人，没意识到把课备好，得花多少时间，特别是——讲课、出考题，还得看看考题出得是不是有意思。我课讲得不赖，我在每节课中都投入了很多想法，它是这么一种课。但我没意识到，这可是好多工作啊！所以，“油尽灯枯”了，我在这儿坐着读《天方夜谭》，内心郁郁不乐。

在这段时间，几个不同的地方（大学和工厂）都让我过去工作——薪金比现在的高。每有这样的事儿，我更觉得压抑。我对自己说，“瞧，他们给我这么好的条件，但他们不知道我已经油尽灯枯了。我当然不能接受。他们期望我做出成绩，但我做不了什么成绩！我可真是没辙了……”

最后，来了封信，里头是“高等研究所”的一封邀请信：爱因斯坦……冯·诺伊曼（Von Neumann）……哎哟喂……所有那些伟大的头脑！他们给我写信，邀请我在那儿当教授！而且还不是一般的教授。不知怎么搞的，他们明白我对这个研究所的感受：它是怎么怎么太理论化了；它是怎么怎么缺乏真正的活动和挑战。所以，他们写道，“我们理解您对实验和教学有相当的兴趣，因此我们做了特别安排，设立了一种特别的教授职位，如果您愿意的话：一半在普林斯顿大学，一半在本研究

所。”

“高等研究所”啊！特殊安排！甚至比爱因斯坦的职位还好！理想，完美，荒唐啊！

确实荒唐。别的邀请，已经让我自羞自惭了，但还有个限度。他们指望我有所成就。但这个邀请，太离谱儿，太不可能，我肯定要辜负人家，荒唐得出了格儿。别的邀请，不过是把事情搞错了；这个邀请，荒谬绝伦！我刮脸的时候，一想到这个，就禁不住笑。

后来，我想：“你知道，他们把你看得神乎其神，但你必定难孚众望，但你没责任满足他们的期望！”

这想头儿，实在是高：别人认为你应该达到什么造诣，但你没有责任来满足他们的想当然。我没有责任成为他们指望我成为的东西。错误是他们犯下的。我无能，与此无关。

“高等研究所”以为我有那么好，就我这方面而言，这和我无能没关系。这事儿是异想天开，明摆着是个错误——从我意识到这事儿可能是他们搞错了的那一刻起，我意识到别的地方，包括我自己所在的这个大学，也是能把事儿搞错的。我就是我，如果他们想当然地以为我很好，主动给我一些钱，那活该他们倒霉。

就在同一天，简直是鬼使神差——兴许是他风闻到我在跟大家说这件事儿，也兴许是他真的理解我——罗伯特·威尔逊[47]，康奈尔大学的实验室主管，把我叫到他办公室去见他。他说，语调严肃，“费曼，你课上得很好。你工作出色，我们很满意。我们或许有些别的期望，可那是个碰运气的事儿。我们聘请一个教授来，所有的风险，应该由我们来承担。如果事情结果很好，善莫大焉。要是不好了，那很糟糕。但你是不必对自己干什么、没干什么这类事情担心的。”他说的比这个还精彩，我如释重负，不必内疚了。

然后，我又有了个想法：现在，我有点儿恶心物理了，但我以前乐于搞物理。为什么我乐于搞物理？我以前是玩儿它。我以前是兴之所至，喜欢干什么就干什么——我干的事儿对核物理的发展，有没有重要意义，我是不必挂心的。我上高中的时候，我看到从水龙头流出的水越来越细，我就想琢磨出是什么玩意儿决定这种曲线。我发现这事儿很容易搞。我不一定要搞这个，它对物理的未来也不重要，别人已经做过这事儿。别人做过了，情况也是一样：东西是我发明的，我和那些东西玩儿，我自得其乐。

于是我就有了这么一种新态度。既然我确实油尽灯枯，永远也不会有所成就，既然我已经在大学里得到了这么一个不错的教学职位，而我非常乐于教学，正如我读《天方夜谭》纯为乐趣一样，那么我在想玩儿物理的时候，就玩玩它，用不着为什么重要性操心了。

就在那个星期的某一天，我在食堂里，有个家伙在那儿胡闹，往空中扔了一个盘子。盘子在空中往上飞的时候，我看到盘子在旋转，我注意到盘子上康奈尔大学的红徽章也在旋转。我看得很清楚，那个徽章转得比盘子快。

我闲着也是闲着，于是就开始琢磨这旋转着的盘子的运动。我发现，在角度很小的时候，徽章的转速是盘子的两倍——2比1。这展现了一个很复杂的方程式！然后，我想："有没有一种方式，一种让我更能看出门道的方式，通过考察一下它的力或者它的动力学原则，看出它为什么是2比1？"

我记不得我是怎么弄的，但我最后算出了盘子上各质点的运动是怎么样的，各加速度是怎么平衡的，使得速度比是2比1。

我仍然还记得我去找汉斯·贝特，说："嗨，汉斯！我看到了个有意思的事儿。瞧，这盘子是这么转的，速度比是2比1，其原因是……"然后给他看各个加速度。

他说："费曼，那很有趣，但它重要吗？干嘛弄这个？"

"啊哈！"我说，"没什么重要的。我弄这个，仅仅是它好玩儿。"他的反应没让我泄气。我已经拿定了主意，我要享受物理，为所欲为。

我继续推导盘子乱转的方程式。然后，我想，在相对论中，电子轨道是怎么开始运动的。然后，有电动力学的狄拉克方程式。然后，是量子电动力学。我还来得及意识到（事儿来得太快）我在"玩儿"（实际上在工作嘛）我如此热衷的相同的一些老问题，那都是我在去洛斯阿拉莫斯的时候耽搁下来的工作：我的那些命题级的问题，所有那些老式的奇妙东西。

这不费什么事儿。和那些东西玩儿，容易。就跟开瓶塞子似的：一切都毫不费力就流出来了。我简直不想让它流出来！我做的事儿，没重要性；可到最后，有的。让我得了诺贝尔奖奖金的那些图表以及整个事情，都来自跟那个旋转着的盘子玩的那些鸡毛蒜皮的事儿。48

有问题吗？

我在康奈尔大学的时候，每星期都要到水牛城的一个航空实验室，去搞系列讲座。康奈尔跟这个实验室搞了个协议，其中就包括康奈尔的人在晚上来讲物理。早先有个家伙已经来讲了，但人家不喜欢听，所以物理系就来找我。那时我还是个年轻教授，不好一口拒绝，因此我同意去讲。

他们让我坐一个小航空公司的飞机，这公司只有一架飞机。公司名叫"罗宾逊航空公司"（这就是后来的"莫霍克航空公司"）。我记得我第

一次飞往水牛城的时候，罗宾逊先生就是飞行员。把机翼上的冰敲掉，我们就飞走了。

总而言之，每星期四晚上都到水牛城，这主意我不喜欢。大学除了报销费用之外，还另给35美元。我是在“大萧条”中长大的苦孩子，琢磨着把这35美元攒起来。在那年头儿，这是一笔不小的钱呢。

突然，我有了个主意：我意识到这35美元的目的，是让水牛城之行更有吸引力；让水牛城之行更有吸引力的方法，是把这钱花了。因此，我决定每次到水牛城的时候，都把这35美元花了，为自己找点儿乐子，我想看看我能不能不虚此行。

在大学之外，我就不怎么老道了。连钱都不知道从哪儿花起，我就让那个在机场接我的出租司机，给我当向导，在水牛城的大街小巷找乐子。他帮了大忙，我仍然记得他的名字——马库索（Marcuso），开169号车。我星期四晚上一到水牛城机场，总向他请教。

我讲第一堂课之前，问马库索：“哪儿有个有意思的酒吧，就是有好些热闹事儿的那种？”我还以为那些事儿是在酒吧里搞的呢。

“阿里比小舍，”他说，“那是个很热闹的地方，在那儿你可以看到好些人。下了课，我就带你去。”

下课后，马库索来接我，开车送我到阿里比小舍。在路上，我说：“听着，我一定得要点喝的。好的威士忌，叫什么名儿？”

“就要黑白威士忌，外加一杯水。”他这么建议。

阿里比小舍是个很雅致的地方，人很多，活动很多。女人穿着毛皮大衣，人人和气，电话一直响个不停。

我走到吧台那儿，要了我的黑白威士忌，外加一杯水。酒吧招待很和气，很快就把坐在我旁边的一位女士介绍给我。我给她买了喝的。我喜欢这地方，拿定主意下星期还来。

每星期四晚上，我都来水牛城，169号车把我送去上课，然后到阿里比小舍。我走进这个酒吧，要我的黑白威士忌，外加一杯水。这么搞了几个星期之后，竟到了这么一种程度：我一进来，一杯黑白威士忌，外加一杯水，就给我预备停当了。“照您的老规矩，先生”都成了酒吧招待跟我打招呼的方式。

我把酒拿在手，一饮而尽，表示我是条硬汉子，跟我看过的电影里的相似，然后我坐20来分钟，把水喝完。过了一些时候，我连水也不用喝了。

酒吧招待总是留意我旁边的空椅子，他很快找来一个漂亮的女人把

椅子填上，一切都进行得很顺利。但就在酒吧打烊之前，她们都不知跑哪儿去了。我想这大概是因为那时我已经醉得不成样子。

有一次，阿里比小舍快关门了，那晚上我给她买酒的那女孩儿，建议我们另找个地方，她认识那儿的许多人。那是另一个房子的二楼，外表看不出楼上还有个酒吧。水牛城的酒吧在两点必须关门，酒吧里的人都被吸引到二楼的这个大厅里，一切继续进行——当然这是违法的。

我想琢磨出个办法，怎么待在酒吧里看看都搞些什么名堂，而不至于醉倒。一天晚上，我注意到，有个经常光临这个酒吧的家伙，要了一杯牛奶。大家都知道他什么毛病：他有胃溃疡，这可怜的伙计。我就有了个主意。

下次我到阿里比小舍，招待说："照老规矩，先生？"

"不了，可乐，就是普通的可乐。"我说，满脸失意之色。

别的家伙围拢过来，都表示同情："是啊，三个星期以前，我就戒这马尿了。"一个家伙说。"真得忍着，迪克，真得忍着啊。"另一个家伙说。

大家都为我感到光荣，我现在"戒马尿"了，而且还有勇气来酒吧，面对所有的"诱惑"，仅仅要了可乐——当然，不喝，也得跟朋友们见面啊。我这么坚持了一个月！我是个真正硬的王八蛋啊。

有一次，我在酒吧的厕所里，那儿有个家伙正在小便。他有那么一点儿醉了，用一种发坏的声音对我说，"我不喜欢你这张脸。我觉得，我会把你这脸，按扁了。"

我吓得脸发绿。用同样发坏的声音，我回敬他："别挡着我路，要不我会尿在你身上！"

他说了点儿别的什么，我琢磨着，这就快动手了。我从来没打过架。我不知道怎么办了，老实说，我也害怕受伤。我确实想到了一件事儿：离墙站得远些，因为我琢磨着，要是我挨了打，后头会撞到墙上。

然后，我一只眼咔嚓一下子，感觉好怪——我伤得不厉害——下面的事儿，我知道，我伺候了那龟儿子一重拳，自动似的。我发现，我连想都不想，就出拳，我觉得这挺怪，这"机器"知道该怎么做。

"这下好了。一比一平，"我说，"还想接茬儿练？"

那小子退后几步，走了。要是那小子跟我一样傻的话，我们会要了对方的命！

我去洗脸，手在哆嗦，牙龈渗出血来——我牙龈本来就不硬——眼

也疼。等我安静下来，我回到酒吧，大摇大摆走到招待那儿：“黑白威士忌，外加一杯水。”我说。我琢磨着，这玩意儿能镇静我的神经。

我没注意到，在厕所里让我给修理了一顿的那家伙，在酒吧的另一边儿，正跟另外三个家伙说话呢。转眼之间，这三个家伙——大块头儿的硬汉子——到我坐的这地方来，在我头顶上，朝我倾轧过来。他们居高临下，虎视眈眈，说：“挑头儿跟我们朋友打架，什么意思？”

我太傻，浑然不知自己大祸临头，我只知道是非曲直。我干脆也飞扬跋扈起来，反唇相讥：“是谁先挑事儿的，你把这事儿弄清楚了，再来给我添乱！”

他们的威胁没起作用，这事儿让几个大块头着实吃惊，退后几步，走了。

过了一阵子，其中一个家伙又回来了，对我说：“你说对了，克里总这么干。他总是跟人家打架，再让我们给他摆平。”

“你知道我没错儿！”我说，这家伙索性跟我坐一块儿了。

克里和另外两个伙计也过来了，在我斜对面坐了下来，错着两把椅子。克里说了点什么，意思是我的眼不大好看，我说他形状也不堪恭维。

我继续这么嘴硬，因为我琢磨着，一个在酒吧里混的真正的汉子，就得这做派。

局势越来越紧张，越来越紧张，酒吧里的人，心都提到嗓子眼儿了。招待说：“伙计们，这不是打架的地方！冷静点儿！”

克里嗤之以鼻：“那好吧。等他出去，我们再跟他算账。”

接下来，一个天才从旁边走过。每个领域中都有一流的专家。这伙计走到我这儿，说，“嗨，丹！我不知道你在城里啊！见到你很高兴！”

然后，他对克里说：“我说，克里！来会会我的一个朋友，丹，就这位。我想，你们两个家伙，会投缘的。干嘛不握握手啊？”

我们握了手。克里说：“啊，幸会。”

然后，这位天才俯在我身上，凑在我耳朵边儿，悄悄说：“快快开溜！”

“可他们说要……”

“走吧你！”他说。

我拿了外套，匆匆出去。我顺着这房子的墙根儿往前走，以免他们找到我。没人出来，我去了我的旅馆。碰巧课在那天晚上讲完了，因此我再也没去阿里比小舍，起码有几年没去。

（10年之后，我确实又去了阿里比小舍，已经面目全非了。它不像以前那样优雅而光洁，破破烂烂的。里头的人，衣衫褴褛。我跟招待聊，不是原来那位，给他讲过去的事儿。“哦对！”他说，“以前啊，赌赛马的和他们的女友，都在这酒吧逍遥。”我这才明白，为什么当年这儿有那么多和和气气、相貌优雅的人，为什么电话响个不停。）

第二天早晨，我起床照镜子的时候，我发现，黑眼圈儿需要经过几个小时才能充分形成。那天，等我回到伊萨卡的时候，我有些东西要交给系主任办公室。一个哲学教授看到了我的黑眼圈儿，咋咋呼呼的，“哦，费曼先生！为什么不告诉我，你是撞到门上才撞成那样儿的！”

“干嘛撞门，”我说，“我在水牛城的酒吧厕所里，跟人干了一架，搞成这样。”

“哈，哈，哈！”他大笑起来。

接下来，上我的正常课的时候，麻烦了。我走进讲座大厅，低着头，研究我的备课本。准备开讲的时候，我昂然直视。以前的开场白，总是那一套——但这次，口气凶悍：“有问题吗？”

我要我的一块钱！

我在康奈尔大学的时候，常常回老家法洛克维（Far Rockaway）看看。有次我碰巧在家，电话响了：是从加利福尼亚来的长途。在那年头儿，长途电话意味着事情非常重要，何况这长途电话是从远在百万千米之外的加利福尼亚这么一个神奇的地方打来的。

那边儿那家伙说：“是费曼教授吗，康奈尔大学的？”

“没错儿。”

“我是某某飞行器公司的某某先生。”他说的是加利福尼亚的一家大飞机公司；很不幸，我记不得是哪个了。这家伙继续说：“我们正在筹建一个实验室，研究核动力推进的火箭飞机。这个项目的年度预算是多少多少百万美元……”

我说：“稍等，先生。我不明白，你干嘛跟我说这个。”

“让我告诉你呀，”他说，“让我把一切解释清楚。请让我按我的方式说话吧。”他又说了一些话，说有多少人要来这个实验室，多少多少人是

这个水平，多少多少博士是那个水平……

“抱歉，先生，”我说，“我想你是找错人了。”

“我不是在跟理查德·费曼说话吗？”

“是的，但你……”

“您能不能让我把话说完嘛，先生？然后，我们再来讨论这事儿。”

“那好吧！”我坐下来，把眼闭上，听他絮叨，讲的都是这个大项目的细节，可他为什么为我提供这些信息，我还是丝毫不明白。

最后，事儿都说完了，他说：“我之所以把我们的计划告诉您，是因为我们想知道，您是否愿意出任该实验室的主任。”

“你找的这个人，真合适？”我说，“我是个理论物理教授。我不是个火箭工程师，不是飞机工程师，也不是任何那类东西。”

“我们确信，我们找的人合适。”

“那你是从哪儿知道我名字的？你为什么决定给我打电话？”

“先生，您的大名在核动力火箭推进飞机的专利书上。”

“哦。”我说，我这才意识到为什么我的名字会在专利书上，待会儿我一定给你讲讲这故事。我对那个人说：“对不起，但我想在康奈尔大学继续当个教授。”

原来，在战争期间，在洛斯阿拉莫斯，那儿有个挺不错的伙计，为政府负责专利局的事儿，他就是史密斯上尉。史密斯给大家都发了一个通知，通知上说，“我们专利局将为您为美国政府贡献的每一个构想申请专利。您关于核能源或者核利用的构想，无论您认为那是人人都知道的，还是人人都不知道的：即请光临我局，将该构想告诉我。”

我在吃午饭的时候看见了史密斯，在我们溜达回技术区的时候，我对他说：“你到处发的那个通知，要我们把每一个构想都告诉你，是有点儿发疯啊。”

我们反反复复讨论了这事儿——等我们到了他办公室时候——我说：“关于核能源的许许多多构想，我都再清楚不过，我会在这儿待上一整天，统统告诉你。”

“都什么呀？”

“别大惊小怪的！”我说。“举例：核反应堆……在水底下……水进到这儿……蒸汽从另一边儿出来……唰——这是个潜水艇。或者：核反应

堆……空气从前边儿涌进来……核反应把它加热……从后窍喷出……嗡的一声穿过大气——这是飞机。或者：核反应堆……你让氢气流过这玩意儿……嗵！——这是火箭。或者：核反应堆……用的不是一般的铀，而是在高温下添加了氧化铍的铀，为的是让它更有效……这是个发电厂。构想嘛，有100万个！”我说着，走出了办公室。

什么动静也没有。

大约3个月后，史密斯叫我到那个专利局去，说：“费曼，潜水艇已经让人家弄了去。但另外三个，是你的。”所以，加利福尼亚的那个飞机公司的那些家伙，在筹建实验室的时候，就想火箭推进什么的专家是何许人也，直截了当去看谁申请了这方面的专利！

无论如何，史密斯让我在一些文件上签字，表示我准备把那三个构想贡献出来，作为政府的专利。这在法律上是冒傻气的：你把这个专利权给了政府，那么你签的那个文件就不是有效的法律文件，除非这其中有某种交易。所以嘛，我签的那份文件上说：“我，理查德·费曼，愿意以一块钱作为回报，将该构想转让给政府……”

我在文件上签了字。

“我那一块钱呢？”

“那不过是个形式嘛，”他说，“我们没有设立这么一项专款，来支付这一块钱啊。”

“肯定有这款子，为这一块钱，字我也签了，”我说，“我要我那一块钱！”

“这也太可笑了。”史密斯抗议。

“不，不可笑，”我说，“这是个法律文件嘛。是你我让签字的，而我这人很老实。如果我在什么东西上签了字，说给我一块钱，那我非得要那一块钱不可。这可不是无理取闹。”

“得得得！”他说，气急败坏了。“我给你这一块钱，我自己掏腰包！”

“成。”

我拿了那一块钱，冒出个主意。我跑到杂货店，买了值一块钱的饼干和糖果，那种里头有果酱软糖的巧克力糖果，买了一大些——那时钱很值钱。

我回到理论物理部，遍施小惠于天下：“我得奖了，各位！吃饼干儿！我得奖了！一块钱就拿走了我的专利！我的专利为我换了一块钱！”

每个有专利的人——许多人都签过字——都跑去找史密斯：要他们那一块钱！

他开始掏自己的钱包，但很快就明白，自己出血出得要破产！他急疯了，想去设立一项专款，好支付那些一味儿坚持要一块钱的主儿。我也不知道他是怎么把这事儿摆平的。

你就这样问她们？

我刚到康奈尔大学的时候，还跟我在新墨西哥州认识的一个女孩儿通信，当时我在为原子弹工作嘛。每当她提起她认识的一个伙计的时候，我就想，不行，在学期结束的时候，我得过去看看，免得事儿黄了。但是，等我去了的时候，我发现黄花菜都凉了，最后我待在阿尔伯克基（Albuquerque）的一家汽车旅馆里，盛暑炎炎，百无聊赖。

我住的这地方，叫“广厦汽车旅馆”（Casa Gran-de Motel），在66号公路边儿上，这是一条横贯这镇子的干线公路。沿着这路往下走过三个地方，有个小夜总会，有娱乐活动。因为我百无聊赖嘛，也因为我喜欢在酒吧里看人、认识人，我就经常到这个小夜总会。

第一次到那儿的时候，我和在酒吧里的一个家伙聊上了，我们瞄上了一张桌子，满桌子都是年轻漂亮的女士——环球航空公司（TWA）的空姐吧，我心里琢磨——在搞什么生日晚会呢。那家伙说，“来吧，咱俩硬着头皮，请她们跳舞。”

于是我们就请她们的两个人来跳舞，跳完了，她俩邀请我俩跟一桌的别的女孩儿坐坐。几杯之后，服务员过来了：“有没有人要点儿什么？”

我喜欢装醉，尽管我完全清醒，转朝跟我跳舞的那女孩儿，短着舌头说：“你要什么？”

“我可以点什么呀？”

“什什什什什什什什什什什么都行——随便！”

“那好啦！我要香槟！”她兴高采烈地说。

我那嗓门儿，酒吧里人人都听得见，我说：“成！香香香槟，人啊人人有份儿！”

然后呢，我听到我那朋友对我那女孩儿说，“他醉了，就敲他银子”，这招数真不体面。我这才想到，我或许犯了个错误。

这下可好，服务员走到我跟前，俯下身来，低声说道：“先生，十六

块钱一瓶，可以吗？”

我决定不要人人都来香槟啦，所以呢，我嗓门比上次还响，“别问这个！”

可让我大吃一惊的是，过了一会儿，服务员带着他的那些花里胡哨的玩意儿回到这桌子——胳膊上搭着白毛巾，一满托盘杯子，一满桶冰块儿，还有一瓶子香槟。他以为我的意思是“别问价钱”，而我的意思是“别问香槟”！

服务员为每个人倒酒，我花了十六块，我朋友跟我那个女孩儿都急眼了，因为他以为她是打算什么账都由我来付。在我看来，事儿就到这儿了——尽管后来才知道，这仅仅是一次新的冒险的开始。

我去那个夜总会去得很频，过了几星期，娱乐节目变了。表演的人是巡回演出的，路经阿玛里洛（Amarillo）49，跑过得克萨斯州的许多地方，上帝知道她们还到过哪儿。夜总会里还有一个常驻歌手，叫塔玛拉。每有一拨到夜总会来表演的，塔玛拉就把我引荐给那群女孩儿当中的一个。那女孩儿就过来挨着我坐在桌边儿，我给她买杯酒，跟她聊聊天儿。当然，我想跟她不仅仅是聊天儿，但每到最后一刻，总有什么事儿不对劲儿了。因此呢，我从来也没搞明白，为什么塔玛拉总是费事把我介绍给那些漂亮女孩儿，而且，接下来，尽管事情开始得很顺利，但我却总是落得个买酒、一晚上空聊，如此而已。我朋友，得不到塔玛拉的照顾，也是无功而返——我们俩都是冤大头啊。

不同的表演，不同的女孩儿，你方唱罢我登场，这么搞了几个星期之后，又有新表演团来了。跟往常一样，塔玛拉把我介绍给这团里的一个女孩儿，我们还是那一套——我给她买酒，我们聊天儿，她还挺漂亮。她先过去表演，演完了就回来跟我坐一块儿，我感觉良好。大家都脑袋朝我这边儿乱转，心里想，“他有什么法术，能把这女孩儿弄到他那儿？”

但是，然后呢，到了本晚的活动将近收场的时候，她说了一个意思，到那时为止，这意思我在以前听到过好几遍了：“我好想让你今儿晚上到我房间来，可我们有个聚会，或许明儿晚上……”——我明白了这种“或许明儿晚上”是个什么意思：别想入非非的了。

呵，整个晚上，我注意到这女孩儿——她名叫格洛瑞娅——和节目主持人说话颇多，表演的时候说，去化妆室的路上说，回来的时候还说。因此，有那么一次，她在化妆室里的时候，节目主持人碰巧从我这桌子旁边走过，我禁不住想知道我猜得对不对，对他说：“你妻子，人不错啊。”

他说：“是啊，谢谢。”我们开始聊了几句。他琢磨着，是她这么告诉我的。格洛瑞娅回来的时候，她琢磨着，是他这么告诉我的。所以他们俩都跟我聊，还邀请我在酒吧关门的时候，当天晚上就访问他们的住

处。

下半夜两点，我跟他们一起到了他们的汽车旅馆。当然没什么聚会，我们聊天儿聊了好一阵子。他们给我看一个相册，是格洛瑞娅的照片，其时她丈夫在爱荷华州第一次遇到了她，一个啃玉米棒子长大的、有点儿稍胖的女人而已；然后，她的另一些照片，瘦了，到眼下，她模样实在是靓丽！他什么都教给她，但他目不识丁，不会写字儿。特别有趣儿的是，因为他干节目主持人这行当，是需要把业余选手进行比赛的剧目和演员名字读出来的，可我甚至没注意到他不会读他正在“读”的东西！（第二天晚上，我看清楚了他们是怎么弄的。在她把一个人领到台上或者领到台下的时候，她瞥一眼他手里的节目单儿，再悄悄告诉他下一个演员的名字和剧目，飘然而去，若无其事。）

这两口子，很风趣儿，很友好，我们谈了很多有意思的事儿。我想起了我们是怎么认识的，就问他们，为什么塔玛拉总是把新来的女孩儿介绍给我。

格洛瑞娅回答，“在塔玛拉打算把我介绍给你的时候，她说，‘现在我要把这一带一位真正的阔佬介绍给你！’”

我不得不想了一阵子，这才意识到，一声气壮声宏却被人误会了的“别问这个”，让我花了十六块钱买的那瓶香槟，结果成了一笔很合算的投资。我显然赢得了某种名士风度的美名，穿戴随意，不修边幅，可为女孩儿们花起钱来，那是一掷千金啊。

最后，我告诉他们，有个事儿，挺让我吃惊：“我算是个挺聪明的人，”我说，“但多半只在物理方面。可在那个酒吧里，聪明的主儿多的是——采油的、开矿的、做大买卖的，诸如此类——他们总为女孩儿们买喝的，可到头来都是竹篮子打水一场空！”（直到那时，我还是推断人人都是白买酒。）“这怎么可能呢，”我问，“一个‘聪明的’的主儿，一进酒吧，怎么可能沦落成这么一个倒霉的傻瓜呢？”

主持人说：“这个嘛，我全明白。这事儿怎么操作，我最清楚不过。我给你上堂课，好让你以后在酒吧里从小妞儿那儿沾点儿便宜。但在开课之前，我得向你展示展示，对我说的这档子事儿，我还真明白。为了做个示范，格洛瑞娅会让一个男人给你买杯香槟鸡尾酒。”

我说：“那敢情好。”但我心里想，“他们怎么弄成这事儿啊？”

主持人接茬儿说：“现在，你必须亦步亦趋，照我说的办。明儿晚上，在酒吧里，你坐得应该离格洛瑞娅远一点儿，等她给你发个暗号儿，你做的仅仅是从她旁边儿走过去。”

“没错儿，”格洛瑞娅说，“小菜儿一碟儿。”

第二天晚上，我到了酒吧，坐在一个角落里，在那儿我可以远远地

看着格洛瑞娅。过了一阵子，果不其然，一个家伙和她坐一块儿了，又稍微过了一阵子，那主儿乐不可支了，格洛瑞娅朝我眨了眨眼。我站起来，若无其事地信步荡过去。就在我经过的时候，格洛瑞娅转过身来，亲切的口气，跟银铃儿似的：“嚯，哎哟喂，迪克！什么风儿把你吹回城里的？最近死哪儿去了呀？”

此时此刻，那主儿乱转脑袋，想看看这位“迪克”是何许人也。从他的眼里，我看到了某种我完全理解的东西，因为我自己就常常身陷此种境地。

第一眼：“噢喔，半路杀出个程咬金。我给她买了酒，他却要把她弄走！会出什么事儿？”

第二眼：“不妨事儿，仅仅是个一般的朋友。他们好像以前彼此认识。”这些，我都看得明白。我从他脸上读得出来。我很明白他脑子里转什么念头儿。

格洛瑞娅朝他说，“吉姆，我想让你会会我的一个老朋友，迪克·费曼。”

第三眼：“我知道怎么对付：对这家伙，我客气着点儿，那样她会对我更好。”

吉姆朝我说，“嗨，迪克。来一杯如何？”

“好极了！”我说。

“喝点什么？”

“就她喝的那玩意儿。”

“招待，请再来个香槟鸡尾。”

果然容易，简直不算回事儿。那天晚上，酒吧关门之后，我又去了主持人和格洛瑞娅的汽车旅馆。他们笑得前仰后合，高兴事儿弄成了。“好了，”我说，“我彻底服了，你们俩都真明白你们讲的那一套。现在，上课怎么样？”

“好吧，”他说，“总的原则是这样：那主儿，想当绅士。他不希望别人把他看成一个不懂礼数的粗汉子，特别不希望人家觉得他小气。只要这妞儿明白这主儿转着什么花花肠子，那么牵着他的鼻子，想往哪儿牵，就往哪儿牵，就是小菜儿一碟儿了。”

“因此，”他接茬儿说，“在任何情况下，都不要假充绅士！你千万不要把那些妞儿当盘儿菜。另外，首当其冲的规则是，不要给妞儿买任何东西——连包烟都不给她买——这事儿，等到你问她是不是愿意跟你睡

觉的时候，再说不迟；等到你确信她愿意，才知道她没撒谎。”

“呃……你的意思是……你不……呃……你就这样问她们？”

“好了，”他说，“我知道，这是你的第一堂课，这么直奔主题，你或许觉得难。那么你倒也可以给她买个什么玩意儿——就是小恩小惠什么的——然后再开口问。可话说回来，这只能把事情搞得更不顺手。”

妥了，人家只需要给我个原则，我就能把事儿领会透。第二天一整天，我进行了完全不同的心理建设。我采取了这么一种态度：酒吧里的妞儿，全是婊子，她们一分钱不值。她们在那儿，全是为了让你给她们买杯喝的，然后呢，她们半点儿好处不让你沾。在这些一分钱不值的婊子面前，我才不当绅士呢，等等。我学而习之，习而成自然。

然后呢，那天晚上，我做好了准备，想以身试法。我跟平常那样进了酒吧，我的那位朋友立刻说：“嗨，迪克！等下儿让你见识见识我今儿晚上泡上的妞儿！她换衣服去了，马上就来。”

“行了，行了，”我说，一副不把这当回事儿的神态。然后，我坐在另一张桌子那儿，看表演。就在表演开始的时候，我朋友的妞儿来了，我心里想，“她就是天仙，我也一个大子儿不出。她能办的，是让他给她买喝的去，她呢，会让他空忙一场！”

第一场演完了，我朋友说，“嗨，迪克！我想让你见见安。安，这是我的一个好朋友，迪克·费曼。”

我说“嗨”，继续看表演。

过了一会儿，安对我说，“干嘛不过来跟我们坐一块儿啊？”

我心里想：“典型的婊子！给她买酒的，是他。可她接着就邀请别人往这桌儿上凑合。”我说：“我在这儿，看得清楚。”

过了一阵子，从附近军事基地来了一个中尉，军装笔挺。转眼之间，在酒吧的另一边儿，安就和那个中尉坐一块儿了！

那天晚上晚些时候，我还坐在酒吧里。安在和中尉跳舞。在中尉背对着我，而她面对着我的时候，她就相当愉快地朝我微笑。我又想了：“婊子！现在，她甚至对中尉又玩儿起了这套把戏！”

接下来，我有了个好主意：我等到中尉也能看到我的时候，才看她，接着报以微笑，这样，中尉就明白了这闹着什么幺蛾子。因此，她的把戏玩儿不长了。

几分钟之后，她不再和中尉在一块儿了，却要酒吧招待把她的大衣和手提包拿给她，明显地提高嗓门儿说：“我想去散散步。有人愿意陪我

去散步吗？”

我心里想：“你可以一个劲儿说不，让他们这么走掉，但你不能永远说不，否则你就不会有所进展。现在，时候到了，你得将就着了。”于是，我就镇定自若地说：“我来陪你。”我们就这样出去了。我们在街上走过了几个街区，看到了个咖啡馆儿，她说，“我有个主意——我们买点儿咖啡和三明治，到我那儿去吃。”

主意不错，我们就进了咖啡馆儿。她要了三杯咖啡，外加三个三明治，我付账。

在我们从咖啡馆儿往外走的时候，我心里想，“事儿搞错了：三明治太多了！”

往她的汽车旅馆走的时候，她说：“你知道，我没时间吃这些三明治了，因为一位中尉要过来……”我心里想：“瞧，没及格不是。主持人给我上了课，告诉我怎么做，而我没及格。我给她买了价值1.1元的三明治，却没向她提任何要求，现在我明白了，又要鸡飞蛋打！我得缓过神儿来，好歹要为我老师挽回面子。”

我当即站住，对她说：“你……还不如个婊子！”

“什么意思啊，你？”

“是你让我买这些三明治，我得到了什么？什么也没有！”

“哼，小气鬼！”她说，“要是你那么想，我就把三明治的钱还你就是！”

她这是虚张声势，我说：“那就还钱。”

她被将了一军。她伸手去摸钱包儿，掏出了她仅有的那么一丁点儿钱，交给我。我拿了三明治、咖啡，走人。

我吃完了，就回酒吧，向主持人汇报。我一五一十把事情讲了一遍，告诉他，很对不起，没及格，但我要努力东山再起。

他心平气和地说：“没事儿，迪克，挺好嘛。因为你到最后也没给她买东西，今儿晚上，她一准跟你睡觉。”

“什么啊？”

“挺好，”他胸有成竹地说，“她一准跟你睡觉，我有数儿。”

“可她人都不在这儿！她在她的住处，和那个中……”

“没事儿。”

大约两点，酒吧关门了，安还是没出现。我问主持人和他妻子，我是不是该到她那儿去一趟。他们说，可以去。

我们正从酒吧往外走，安来了，穿过66号公路朝我跑过来。她一下子投在我怀里，说：“快，到我那儿。”

主持人说得不差啊。可见他课上得棒！

等我到秋天返回康奈尔大学的时候，我和一个毕业生的妹妹跳舞，她是从弗吉尼亚州来看她哥的。她很漂亮，突然我脑子里冒出个念头儿：“找个酒吧，我们去喝一杯。”我说。

在去酒吧的路上，我硬着头皮想在一个正常女孩儿身上试试主持人的课程。毕竟，酒吧里的妞儿，一个心眼儿想让你为她买喝的，你不把她当盘儿菜，并不内疚——但是，一个漂亮的、正常的、南方的女孩儿呢？

我们进了酒吧，我还没坐下，就说：“听着，在我给你买喝的之前，我只想知道一件事儿：今儿晚上，愿意跟我睡觉吗？”

“愿意。”

因此，他的课程对正常女孩儿也灵！但是，无论这课程多么灵验，我在那之后真的不曾再用过。像那么个搞法，我不喜欢。但是，知道事情的运作方式，和我小时候得到的那一套教育，大大的不同，这也有趣儿。

幸运数字

在普林斯顿大学，有一天，我在休息室坐着，无意听到几个数学家在讨论e^x的级数，把它展开就是$1+x+x^2/2!+x^3/3!$。每一项，都是通过把前一项乘以x并除以下一项的项数来得到的。比方说，为了得到$x^4/4!$选后面的那一项，你就把它乘以x并除以5。这很简单。

在我还是个小孩儿的时候，就对级数着了迷。我已经用那个级数计算过e的值，看到新的那些项是如何很快变小的。

我喃喃自语，用那个级数来计算e的无论多少次幂，是多么容易（只要你用幂次来代替x即可）。

“哦是吗？”他们说，“那好，e的3.3次方是多少？”有个玩笑大王说——我想那是涂基（Tukey）。

我说：“那容易，是27.11。”

涂基知道把它心算出来并不容易。“嗨！你怎么算的？”

另一个家伙说："你们知道费曼，他信口雌黄。那数，实际上不对。"

他们去找数学用表，就在他们找的时候，我又加上了几位小数："27.1126。"我说。

他们在表上找到了。"对啊！可你是怎么弄出来的？"

"我只是把级数逐项加起来。"

"没人能那么快就把这个级数加起来。你必定是碰巧知道了那个数。e的3次方是多少？"

"干嘛呀，"我说，"这活儿很累！一天只算一个！"

"哈！弄虚作假！"他们得意地说。

"那好吧，"我说，"是20.085。"

在他们查表的时候，我又加上了几位小数，现在他们可就兴奋起来了，因为我又说对了。

在场的都是当年的几个大数学家，茫然不知我是怎么算出e的任意次幂的！其中的一个说，"他绝不可能只是在进行代换和加法运算——那太难了。有窍门的。你不可能随便算出像e的1.4次方这样的数。"

我说："这活儿很累，但我给你面子，是4.05。"

在他们查表的时候，我又加上了几位小数，说，"今天到此为止！"出去了。

其实是这样：我碰巧知道三个数——以e为底的10的对数（用来把数字从以10为底换为以e为底），值是2.3026（因此我知道e的2.3次方非常接近于10）。因为放射现象（半衰期），我知道以e为底的2的对数是0.69315（因此，我也知道e的0.7次方差不多等于2）。我还知道e（它的1次方）是2.71828。

他们要我计算的第一个数，是e的3.3次方，它等于e的2.3次方（等于10）乘以e，得27.18。在他们忙着瞎猜我是怎么算出来的时候，我在修正我的答案，减去了多出的0.026——因为以e为底的10的对数2.3026，是稍微多了一点儿。

我知道，再要我算一个数，那就算不出来了，刚才完全是碰运气。但是，那家伙接着问的却是e的3次方：那就是e的2.3次方乘以e的0.7次方嘛，或者说是10乘以2。所以我知道得数是20多一点儿。在他们怎么想也想不出我是怎么算的当口儿，我又对答案做了0.693的调整。

现在，我真的知道再一再二，不能再三了，因为上一个数仍然是纯粹碰运气。但是，那个家伙说的是e的1.4次方是多少。那是e的0.7次方乘以它自身。因此，我只需要在4上面稍微加一点儿而已！

他们怎么也琢磨不出我是怎么算的。

我在洛斯阿拉莫斯时，我发现汉斯·贝特绝对是计算高手。比方说，有一次，我们要把几个数代入公式，最后算到48的平方。我就找玛珍计算机，他说，“是2300。”我开始按按钮，他说：“如果你要精确的数字，那就是2304。”

机器的得数是2304。“嚯！这可太神了啊！”

“怎么计算接近50的数的平方，你不知道吗？”他说，“你先算出50的平方——是2500——再从2500里减去100乘以你的数和50之间的差（在这个例子里是2）。如果你要的是精确的数，那就把那个差数的平方加上去，那就是2304嘛。”

几分钟后，我们需要算出21/2的立方根。用玛珍计算机算立方根，得先查数学用表，查出一个近似值。我开了抽屉找表——这次花的时间长些——他说：“大约是1.35。”

我用玛珍一试，对了。“你怎么算出这个的啊？”我问，“你知道求立方根的秘诀吗？”

“啊，”他说，“21/2的对数是多少多少。这个对数的三分之一在1.3的对数多少多少和1.4的对数多少多少之间，那我就在这两者之间内插了一个数。”

因此，我发现了一点儿东西：第一，他背得下来对数表；第二，光是他做的内插计算量，我找数学用表、拿计算机敲键，也要花费更长的时间。这给我的印象，太深刻了。

此后，我也想干这样的事儿。我记住了几个对数，开始注意事儿。比方说，如果有个人说，“28的平方是多少？”你会注意到2的平方根是1.4，而28是20乘以1.4，因此28的平方必定大约是400乘以2，或者说800。

如果有个人过来想算1除以1.73，你可以张口就来，是0.577，因为1.73近似于3的平方根，因此1/1.73必定是3的平方根的三分之一。如果要算1/1.75，那它刚好是7/4的倒数即4/7，而你记得1/7的循环小数0.142857142857……，于是得数就是0.571428……

和汉斯用窍门儿快速计算，我得到了很多乐趣。我知道答案而他不知道，这种情况很少。等我答对了一个，他就开怀大笑。他几乎总能回答任何问题，误差不超过百分之一。每个数都接近他知道的一个数——

对他而言，这很容易。

有一天，我不知道天高地厚了。午饭的时候，在技术区，也不知道我从哪儿冒出个念头儿，反正我宣布：“任何人在10秒之内能说完的任何问题，我都能在60秒内答出来，误差10%！”

大家开始把他们认为可能算难的问题说给我，例如，计算1/（$1+x^4$）的函数的积分，在他们给我的x的范围内，这东西几乎是不变的。有人给了我一个最难的问题，是算出$(1+x)^{20}$中的x^{10}的二项式系数，我刚好在时间快到的时候答出来了。

他们都给我出难题，我得意扬扬，那时保罗·奥伦（Paul Olum）刚好从大厅走过。在来洛斯阿拉莫斯之前，保罗和我在普林斯顿一起工作了一段时间。他总是比我聪明。比方说，有一天，我正心不在焉地玩儿一个卷尺，就是你一按按钮，就啪地一下子缩回去的那种。尺子总是缩过头儿，打在我的手背上，真有点儿疼呢。“哎呀！”我叫起来。“我真是个呆子。老是玩儿这玩意儿，每次都打疼了我的手。”

他说：“你拿得不对劲儿。”他把这鬼东西拿过去，把尺子拉出来，按按钮，它好好地就缩回去了。不伤人的。

“哇！你是怎么弄的啊？”我喊道。

“自己琢磨！”

此后几个星期，我在普林斯顿大学，无论到哪儿，手里总在玩儿卷尺，手都打破皮了。最后，我受不了了。“保罗！我作罢了！你到底是怎么握的，让它打不着你？”

“谁说它打不着我？它打我也打得怪疼啊！”

我觉得自己怎么这么蠢啊。他愚弄我到处拿着个卷尺打自己的手，直打了两个星期！

刚才说到奥伦正走过吃午饭的地方，这帮家伙都兴奋不已。“嗨，保罗！”他们大声叫。“费曼可了不得！我们在10秒钟内给他出题目，可他一分钟就给得数，误差10%。你干嘛不给他出个题目？”

他几乎连脚步也没停，说，“10的100次方的正切函数值。”

我的嚣张气焰下去了：你必须把一个一百位数除以π！这可没指望了。

我有一次吹牛说：“任何人都得用路径积分来解决的问题，我就能用别的办法来得出答案。”

奥伦就给了我一个罪该万死的积分：他从一个他知道答案的复杂函

数开始，把它的实部去掉，只把虚部留下，就得到了这么个积分。他已经把它展开了，所以它非得用围道积分法不可！他总是让我这样泄气。他是个非常聪明的伙计。

那是我头一次到巴西的事儿。我在我也不知道的什么时间吃午饭——我来饭店，总是来得不是时候——那地方只我一个顾客。我就着牛排（我喜欢）吃米饭，周围站着四个服务员。

一个日本人进了饭店。我以前见过他，看到他到处兜售算盘。他开始和服务员说话，向他们挑战：他说他算加法比他们谁都算得快。

服务员不想丢面子，他们就说：“是啊，是啊。你为什么不到那边儿，向那位顾客挑战呢？”

这人过来了。我抗议道：“可我葡萄牙语说得不好！”

服务员笑了。“数字，容易。”他们说。

他们给我找来一支铅笔和纸。

这人让服务员喊出数字好加起来。他把我赢得好惨，因为在我把数写下来的当口，他却在拨弄算盘珠子的同时，得数已经出来了。

我建议服务员，在两张纸上写下相同的一些数，然后同时交给我们俩。这没造成多大变化。他还是胜过我许多。

可是，这人得意忘形了：他想显显别的本事。“Multiplicacçãao！”他说，要比乘法。

有个人写了个题，他又打败了我，但只是险胜，因为我乘法是相当好的。

然后呢，这人犯了个错误：他建议我们接着比除法。他有所不知的是，题越难，我胜算越大。

我们俩都做了一道很长的除法题。平了。

这让这个日本人坐立不安，因为他的珠算显然训练有素，可在这儿，差点儿败在饭店里吃饭的一个家伙手里。

“Raioscubicos！”他说，想报仇。立方根啊！他要用算术法求立方根！在算术中，再也找不到比这更难的题了。在他的算盘国度中，这想必是他的拿手好戏。

他在纸上写了个数——随便写的——我至今还记得：1729.03。他拨开了算盘，满嘴叽里咕噜，叽里咕噜——跟魔鬼似的忙个不亦乐乎。他挥汗如雨，跟这个立方根干上了。

与此同时，我在那儿闲坐呢。

一个服务员说："你干嘛呢？"

我指了指脑袋。"想呢！"我说。我在纸上了写了12。沉吟片刻，我有了得数12.002。

使算盘的这主儿，抹掉脑门子上的汗："12！"他说。

"啊，不对！"我说。"再加几位数！再加几位数！"我知道，用算术法求立方根，每一位数都比前头那位数更费工。这活儿累得很。

他又埋头干开了，嘟嘟囔囔的。趁这工夫，我又加上了两位数。他最后抬起头来说："12.0！"

服务员们兴高采烈，乐不可支。他们告诉这主儿："瞅瞅！人家寻思寻思就成，你呢，还得用算盘！人家还多好几位数呢！"

他一败涂地，满面羞赧，溜之乎也。服务员们弹冠相庆。

这顾客怎么打败算盘的？题目是1729.03。我碰巧知道1立方英尺（1立方英尺≈0.03立方米）有1728立方英寸（1立方英寸≈16.39立方厘米），因此答案比12大一丁点儿。多出的1.03，大约只有1/2000。我在微分课上学过，对小分数而言，立方根超出的部分是数字超出部分的1/3。因此，我只需要算出1/1728是多少，再乘以4（即除以3再乘以12）。所以，我的得数就有那么多位数。

几个星期之后，那个人来到了我住的宾馆的鸡尾酒休息室，当时我坐在那儿。他认出我来，就过来了。"告诉我，"他说，"你怎么能那么快算出立方根？"

我就开始解释，说那是一种求近似值的方法，跟误差的百分比有关。"假设你给我的数是28。现在这么想，27的立方根是3……"

他抓起算盘：噼里啪啦，噼里啪啦——"哦，是啊。"他说。

我发现，他不懂数字。靠着个算盘，你是不必记住一大堆算术组合的，你只需要学会怎么上上下下拨弄小珠子就成。你不必记住9+7=16，你只需要知道，在你加9的时候，你只要把十位上的珠子推上去，把个位上的珠子拉一个下来。弄起基本算术来，我们慢些。但我们懂数。

另外，近似值方法的整个观念，他是理解不了的。在大多数情况下，用任何方法都求不出立方根的精确得数，他连这一点也不知道。因此，我跟他解释不清我是怎么求立方根的，也解释不清在他碰巧选了1729.03这个数的时候，我有多么幸运。

又是这个美国人！

有一次，我捎带了一个搭便车的，他告诉我南美有多么有意思，还说我一定得到那儿去一趟。我发牢骚，说语言不通，但他说，去学就是——问题不大。我就想了，主意不错：我要到南美。

康奈尔大学有外语课，用的仍然是战时的办法：大约十个学生一个小组，一个外国人只讲外国话——再没别的。在康奈尔大学，由于我是个面相年轻的教授，我就决定参加一个班，像个一般学生似的。还因为我不知道我最终会到南美的什么地方，我就决定学西班牙语，因为那儿大多数国家都说西班牙语。

因此，等到语言班报名的时候，我们都站在外边儿，等着到教室里去，就在这当口，一个魅力四射的金发碧眼的妞儿，飘然而至。你知道，你立刻会有什么感觉，哇！这不是天仙下凡吗！我暗自念叨，"或许她要参加西班牙语班——那可就太美了！"可是，不，她款步进了葡萄牙语班。于是我琢磨着，管它的——我或许也可以学学葡萄牙语。

我开始在她身后亦步亦趋，可我那盎格鲁撒克逊式的观点冒出来了，我说："别，决定说哪种语言，这理由站不住脚。"于是我就又折回去，报名参加西班牙语班，心里却是一百个不乐意。

不久之后，我参加了在纽约举办的物理学会的会议，我发现自己坐在翟米·第奥诺（Jaime Tiomno）旁边，他是巴西来的，他问我："这个夏天，准备干什么？"

"我正琢磨着，到南美走走。"

"哦！为什么不到巴西来？我会在'物理研究中心'给你弄个位置。"

这么说，我现在必须得改弦更张，学葡萄牙语了！

我在康奈尔大学找到了一个葡萄牙的研究生，每个星期他教我两次课，所以我可以把我已经学到的西班牙语都改成葡萄牙语。

在飞往巴西的飞机上，我碰巧和哥伦比亚州的一个家伙坐在一起，他只会说西班牙语：所以，我不跟他说话，因为我不想把葡萄牙语和西班牙语混成一团。但坐在我前边的两个家伙，说的是葡萄牙语。我从来不曾听到过真正的葡萄牙语。我的那位老师，说得又慢又清楚。这里的这两家伙，说话跟爆豆儿似的，卜啦卜啦卜啦卜啦—啊—塔，卜啦卜啦卜啦卜啦—啊—塔，我连"我"或者"这个"这两个词儿都听不清，什么也听不清。

最后，等我们在特立尼达岛（Trinidad）停机加油的时候，我凑到这两伙计那儿，用葡萄牙语，或者我自以为是的葡萄牙语，慢慢说："打扰了……你们能够听明白……我现在对你们正在说什么吗？"

“Puesnao, porquenao?”——“能啊，干嘛听不明白？”他们回答。

于是我就尽力跟他们解释，说我学葡萄牙语，现在都学了几个月了，但是还没有听到过在谈话中的葡萄牙语，在飞机上我一直在听他们说话，但是，他们说的话，我连一个字也听不懂。

“哦，”他们笑着说，“Naoe Portugues！ELad-ao！Judeo！”他们在说：他们说的那种葡萄牙语并不纯粹，就好像犹太人说的那种好像德语的意第绪语50一样，所以，你可以想象一下：一个学德语的家伙，坐在两个说意第绪语的后头，想琢磨出他们在聊个什么。他们说的显然是德语，但不管用。他想必是没把德语学到家。

等我们回到了飞机上，他们指给我看另外一个人，他真说葡萄牙语，所以我就挨着他坐了。他一直在马里兰州研究神经外科，所以和他谈话，来得容易——但我必须跟他谈“cirugia neural, o cerebreu”（“神经循环、神经中枢”）之类的“复杂”东西。比较长的英语词，实际上很容易翻译成葡萄牙语，因为唯一的区别只是词尾不同：英语的“-tion”在葡萄牙语中是“-ção”；“-ly”是“-mente”，如此等等。可是，等他朝窗外看，说了个什么简单的东西的时候，我却摸不着头脑了：我不会翻译“天是蓝的”。

我在累西腓（Recife）下了飞机[巴西政府负责我从累西腓到里约（Rio）的旅费]。恺撒·雷提斯（Cesar Lattes）的岳父、妻子和另一个人来接我。雷提斯是位于里约的“物理研究中心”的主任。两个男人去取我的行李的时候，这位太太用葡萄牙语对我说：“你说葡萄牙语啊？你是怎么学葡萄牙语的啊？”

我回答得很慢，费了好大的劲。“首先，我还是学习西班牙语……然后我发现我要去巴西……”现在我想说的是“所以，我学了葡萄牙语。”但是，我想不起“所以”（“so”）是怎么说的。我知道怎么说比较大的词儿，因此我是这么结束这个句子的：“Con-sequentemente, apprendi Portugues！”——“因此之故，我学了葡萄牙语！”

两个男人带着行李回来了，她说：“哎，他会说葡萄牙语！而且还会用‘因此之故’这种了不得的字眼儿呢！”

接着，广播喇叭传来一个通告。到里约的航班取消了；到那儿的航班，星期二才有——但我最迟也得在星期一到达里约。

我觉得非常不安。“或许有货机。我坐货机得了。”我说。

“教授！”他们说，“累西腓这儿实在不错。我们带你到各处看看。干嘛不放松一下——你现在是在巴西啊。”

那天晚上我在城里溜达，遇到一小群人围着看马路中间的一个长方形大坑——挖这坑是为了铺设排污管道什么的——坑里边儿，一辆小汽

车，踏踏实实地坐在里头。事儿有点儿巧：这坑把车嵌得严丝合缝，车顶棚刚好与路面齐平。工人在傍晚收工的时候，懒得立几个标志，而那个家伙也果真把车开了进去。我注意到了一个区别：我们挖坑的时候，就有各种各样的绕行标志，还有闪闪发光的灯，来保护我们。在那儿，他们挖了个坑，等一天的活儿干完了之后，就那么走人了。

不管怎么说，累西腓是个不错的城市，我也确实等到下星期二才飞到了里约。

等我到了里约，我见到了恺撒·雷提斯。国家电视台想为我们的会面拍点儿录像，所以他们就开拍了，但一点儿声音也没有。摄像师说："摆出你们正在谈话的样子。说点儿什么——说什么都成。"

雷提斯就问我："你找到一本枕边儿词典了没有？"

那天晚上，巴西的电视观众，看到这位"物理研究中心"的主任在欢迎来自美国的访问教授，但大家一点儿也不知道他们谈的，竟然是找个女孩儿度此良宵！

等到了中心，必须决定我讲座的时间——上午还是下午。

雷提斯说："学生喜欢下午。"

"那就下午吧。"

"可下午在海滩上玩儿才好，所以，你为什么不在上午讲座，下午你就可以到海滩上逍遥。"

"但你说学生喜欢在下午听讲座。"

"那个你不必担心。照对你最方便的办法来！下午到海滩玩儿去。"

因此，我学会了一种不同于美国的看待生活的方式。首先，他们不和我那样急匆匆地。其次，如果事情对你比较好，那用不着担心！于是，我就在上午上课，下午到海滩上玩儿。早知道有海滩，那我首先就会学葡萄牙语，而不是西班牙语。

我原本想用英语上课，可我注意到：当学生用葡萄牙语向我解释什么事儿的时候，我听不大懂，虽然我还是知道一点儿葡萄牙语的。他们说的是"增加"还是"减少"，是"不增加"还是"不减少"，还是"慢慢减少"，我是不大清楚的。但是，在他们苦苦挣扎地说英语的时候，他们会发出一些"啊啪"或者"度恩"之类的声音；尽管他们发音稀松，语法勉强，我还是能猜出他们想说什么。因此，我明白了，如果我要跟他们说话，想教他们，最好是我来说葡萄牙语，我说得蹩脚就蹩脚吧。那样的话，他们听起来会容易些。

我第一次在巴西待了六个星期，那时我得到了邀请，要在“巴西科学院”讲个话，讲我刚刚做完的量子动力学的一些事情。我想，我要用葡萄牙语讲这个话，中心的两个学生说会帮我的忙。我开始把我的讲话用绝对稀松的葡萄牙语写出来。我是自己写的，因为如果让他们来写，我不认识的词儿就太多了，也读不好。因此，我写，他们改正语法，改正错字，弄得好一点儿，但文字水平，仍然允许我读得容易，多少知道我在讲什么。他们帮助我读得绝对正确：“de”应该介于“deh”和“day”之间——一定得读成这样。

我到了“巴西科学院”的大会上，头一个讲话的，是个化学家，站起来，发言——用英语。他这是为了表示礼貌，还是怎么的？我听不懂他说了什么，因为他的发音糟透了；但是，或许别人都有相同的口音，所以他们能听得懂吧；懂不懂的，我也不知道。接着，另一个家伙站起来，用英语发表他的讲话！

轮到了我，我站起来，说：“我很抱歉。我没想到‘巴西科学院’的官方语言是英语，因此，我的讲话没用英语来准备。因此，请原谅，但我是不得不用葡萄牙语来发言了。”

于是我就读这个东西，大家都听得很愉快。

下一个家伙站起来说：“学习美国同事的榜样，我也用葡萄牙语讲话。”因此，就我所知，我把“巴西科学院”的语言传统改变了。

几年后，我遇到了一个从巴西来的人，一字不差地引用了我在科学院讲话的头几句儿。很明显，我的讲话给他们留下了深刻印象。

但是，这种语言，我觉得很难，我就学而不倦，看报纸，等等。我一直坚持用葡萄牙语上课——我称之为“费曼葡萄牙语”，我知道，它不可能和地道的葡萄牙语是一个东西，因为我能知道我讲的是什么，但我不知道街上的人讲的是什么。

因为我太喜欢我第一次在巴西的经历，一年之后我又去了，这一次是10个月。这一次我在里约大学讲课，他们本该给我钱的，但从来没给，因此中心一直在给我里约大学本该给我的钱。

我最后住在位于克帕卡巴纳（Copacabana）海滩上的一家旅馆里，旅馆名叫“米拉玛”（Miramar）。住了一阵子，我住在了十三楼上的一个房间里，我可以从窗口看大海，看海滩上的女孩儿。

后来才知道，这家旅馆是“泛美航空公司”（Pan American Airlines）的飞行员和女乘务员“下榻”的地方。“下榻”这个词儿，我总觉得有点儿叫人反胃。他们的房间都在四楼，夜半更深的时候，常有人偷偷摸摸、鬼鬼祟祟地在电梯里串上串下。

有一次，我离开旅馆几个星期在外旅行，到我回来的时候，经理告

诉我，他不得不把我的房间订给了别人，因为那是最后一个空房间，他已经把我的东西搬到另一个房间去了。

那个房间正好在厨房那边儿。人们通常在这里住不长的时间。这位经理算是琢磨透了：我是唯一看得出住在那个房间有好处的一个家伙。非常清楚的是，我会忍受油烟味儿，不会发牢骚。我真没发牢骚：房间在四楼，离女乘务员很近。这省了不少麻烦。

航空公司的人，不知怎么，厌倦自己的生活。真够奇怪的是，晚上她们常去酒吧喝酒。我喜欢她们这些人，为了显得合群儿，一个星期好几个晚上，我都和她们一块儿去酒吧喝上几杯。

有一天，大约在下午三点半，我在克帕卡巴纳海滩对面的人行道上溜达，遇到一个酒吧。我突然有一种极其强烈的感觉："我要的就是这个。说着娘家人儿，孩子他舅舅就来了。此时此刻，我就是想喝一杯！"

我就开始迈步进酒吧，可我突然脑子里想："且慢！这才下午正中间，这儿什么人也没有。没什么社交理由要喝酒啊。可你必须得要喝一杯，你为什么有这么一种强烈的感觉？"——不想不知道，一想吓一跳。

从那以后，我再滴酒不沾了。我想，实际上，我并没有处在什么危险之中，因为我发现，悬崖勒马，并不算难。但那种我不理解的强烈感觉，吓着我了。你知道，我不想毁了这个最令人愉快的机器，这机器使生活成为这么一大乐子。我从这种思考过程中，得到了好大的乐趣。后来，尽管我对幻觉很是好奇，但还是踌躇于拿迷幻药亲身实验，也是出于同样的理由。

在巴西快到年终的时候，我带着一位空姐——一位扎着辫子的、非常可爱的女孩儿——到博物馆去。在我们走过埃及部分的时候，我发现自己在向她讲这么些事儿："石棺上的翅膀，意思是这个这个；这些瓶子，是用来放人的内脏的；转过那个角落，那里应该有那个那个……"我暗自思忖："你自己知道，你是从哪儿听来的这些个东西？是从玛丽·娄（Mary Lou）那里听来的啊"——她不在身边，我觉得寂寞。

我是在康奈尔大学遇到玛丽的，后来，等我去了帕萨迪纳（Pasadena）[51]，我发现她已经来到了附近的威斯特伍德（Westwood）。我喜欢她有一段时间，但我们经常吵架。最后，我们断定事情没希望了，我们就分了手。但是，一年的时间，和这位空姐里出外进，却无功而返，我灰心丧气。因此，当我给这女孩儿讲这些事儿的时候，我觉得玛丽·娄实在是个好女孩儿，我们不应该吵的。

我给她写了一封信，求婚。明白人都会告诉我，这是危险的：你在外头，除了信，你什么也没有，你觉得寂寞了，你就只记得那些美好的事情，忘记了你们是为什么吵架的。结婚，也解决不了问题。一结婚，争吵又起，这桩婚姻只延续了两年。

美国使馆有个人，知道我喜欢桑巴音乐。我想我告诉过他，我第一次在巴西的时候，曾经听过在街上练习的一个桑巴乐队的演奏，我也想多了解一些巴西音乐。

他说，有一个叫“土风”的小乐队，每星期在他的公寓里练习，我可以过去听他们演奏。

有三四个人——一个是这公寓的看门人——他们在这个公寓演奏的音乐非常安静，他们没有别地方演奏。有个家伙打小手鼓，他们称之为“盼得乐”（pandeiro），另一个家伙拨弄小吉他。我总是听到有敲鼓的声音，但没有鼓啊！最后，我琢磨出那是小手鼓的声音。那家伙演奏小手鼓的手法很复杂，手腕乱转，用拇指敲打鼓皮。我发现这有趣儿，多少学会了怎么演奏盼得乐。

稍后，狂欢节即将来临。这是个展示新曲子的季节。他们并不一年到头儿推出新曲子和新唱片。他们等到狂欢节，才全盘端出来，这可令人兴奋啊。

原来，这位看门人是一所小桑巴“学校”的作曲家——说它是个学校，搞的却不是教育，而是沽名钓誉——在克帕卡巴纳海滩上沽名钓誉。这乐队名叫“Farqantesde Copacabana”，意思是“克帕卡巴纳的骗子”，这很合我的口味儿，他还请我入伙儿。

原来这个桑巴学校是这么个东西：大家从远近的法维拉（favelas）——也就是这城市的贫民区——赶来，在一处正在施工的公寓楼建筑工地的后面集合，为狂欢节排练新曲子。

我选了一样儿名叫“福瑞吉得乐”（frigideira）的东西来演奏，那是个金属造的玩具平底锅，直径6英寸（约15.24厘米），用小金属棍儿来敲。它是一种伴奏乐器，伴随着主要的桑巴曲子和节奏，它弄出的动静，脆而快，使曲子丰富多彩。因此，我就试着玩儿这个东西，一切都进行得很顺利。我们在排练的时候，乐声一路喧嚣，跟20世纪60年代那股子狂劲儿相似。大家闹得正欢，突然之间，首席演奏家，一个大块头儿的黑人，大喝一声：“停！停住，停住！——等一下儿。”大家都僵在那儿。“福瑞吉得乐，出了毛病！”他声如雷鸣，“OAmericana, outra vez！”（“又是这个美国人！”）

于是我就觉得不自在。我不停地练习。我抓着那两根儿棍儿，沿着海滩走，手腕儿乱转。练啊，练啊，练啊。我一直在捣鼓这个，但总觉得不如人，总觉得扯了人家后腿，总觉得自己不是这块儿料。

好了，越来越接近狂欢节了。有一天晚上，乐队队长和另一个家伙在谈事儿，接着，队长开始转着圈儿地走，在选人呢：“你！”他对一个号手说。“你！”他对一个歌手说。“你！”——他指着我。我还以为我们这些人都是淘汰的呢。他说，“到前头去！”

我们向前走到建筑工地前边儿——我们五六个人——那儿有一辆旧卡迪拉克敞篷小汽车，篷子拉了下来。“上车！”队长说。

车地方不够我们坐，我们有几个人得坐在后车帮上。我对我旁边的那家伙说：“他在干吗？——打发我们滚蛋？”

“Naose, naose.”（“我不知道。”）

我们的车离开大路，往边儿上的高坡上开，停在悬崖的边儿上，俯瞰着大海。车停了，队长说：“下车！”——他们把我们带到悬崖边儿上！

果然，他说：“站成一排！你第一，你下一个，你下一个！开始奏乐！现在，齐步走！”

我们会齐步掉下悬崖的——多亏有条向下的陡坡儿。我们的小乐队就这样走下了这条小路——号、歌手、吉他、盼得乐、福瑞吉得乐——来到了一个在树林里举办的露天晚会上。我们被挑出来，不是因为队长想把我们打发走。他派我们到这个私人晚会上，那儿需要桑巴舞曲！后来，他敛了点儿钱，好为我们乐队买服装。

此后，我感觉好些，因为我明白，在他挑选演奏福瑞吉得乐的人时，他选了我！

还有一件事儿，增强了我的自信心。过了一段时间，从另一个桑巴学校来了个家伙。那学校在勒巴伦（Leblon），在更远的那边的那个海滩上。他想加入我们学校。

老板说：“你哪儿来的？”

“勒巴伦。”

“你演奏什么？”

“福瑞吉得乐。”

“那好。让我听听你演奏福瑞吉得乐。”

这家伙于是就操起他的福瑞吉得乐和他的金属棍儿，接着，“卜拉哒哒，哧可啊哧可。”嚯！妙啊！

老板对他说：“你到那边儿去，挨着美国人站着，你会学会怎么演奏福瑞吉得乐！”

我的推测是这样：这就像一个说法语的人到了美国。刚开始，他们出各种各样的错误，你简直听不明白他们说什么。后来，他们坚持练习，终于说得很像样儿，而且你发现，他们说话的方式，有一种挺悦耳

的弯弯儿——他们的口音颇为好听，你很爱听他们说话。所以呢，我在演奏福瑞吉得乐的时候，想必也有某种口音，因为我不可能和那些演奏了一辈子福瑞吉得乐的家伙比试比试。那必定是某种傻乎乎的口音。但是，不管是什么吧，我成了一个相当成功的福瑞吉得乐演奏家。

有一天，那就快到狂欢节了，桑巴学校的队长说："好了，我们要到街上排练走步。"

我们都从建筑工地出发到了街上，街上车水马龙。克帕卡巴纳的街道总是一团乱。不管你信不信，有一条电车线，电车在那儿往一个方向走，汽车在那儿朝另一个方向走。当时正是克帕卡巴纳的高峰时间，而我们是打算齐步走到"大西洋大街"的正中间。

我对自己说："耶稣！老板还没弄许可证呢，他还没征得警察的同意呢，他什么也没干。他决定我们就那么出去。"

于是我们就出发到了大街上，周围的每一个人，兴高采烈。几个看热闹的，自告奋勇，拿根绳子，把我们围在一个大正方形里，免得行人闯进我们的行列。人们把脑袋探出窗外。人人都想听到新的桑巴舞曲。场面令人非常兴奋！

我们一开始行进，我就看到一个警察，在马路对面不远处。他张望着，看那儿闹腾什么，然后让车辆改道行驶！一切都不是正式的。没人做过安排，但事儿还搞得不错。人们在我们四周扯着绳子，警察在让交通改道，行人在拥挤，交通被堵塞，可我们却畅行无阻！我们走完了大街，转过街角，转遍了这个乱糟糟的克帕卡巴纳，一切都是率性而发的！

最后，我们停在一座公寓楼前的小广场上，老板的妈住这儿。我们在这地方站着演奏，那家伙的妈，他姑妈，七大姑八大姨，倾巢而出。她们还戴着围裙呢。她们一直在厨房里忙活呢，你看得出来，她们喜出望外——她们几乎要哭出来。这才是人性啊，确实美好啊。大家都从窗口探出身来——难以形容啊！我记起了我上次来巴西的时候，看到过一个桑巴乐队——我是多么热爱这种音乐，几乎欣喜若狂了——现在，我身在其中！

顺便告诉你，我们那天绕着克帕卡巴纳游行的时候，我看到人行道上的一群人当中，有两位美国使馆的年轻女士。下星期，我接到使馆的一封信，说："您做了一件了不起的大事，这个这个，那个那个……"喋喋不休的一堆废话，好像我的目的是为了改善巴美关系似的！所以我做的事才是"大"事嘛。

书归正传，为了去排练，我不想穿平常穿的那种衣服，就是我到大学时穿的那种。乐队里的人很穷，只有破烂不堪的衣服。我就穿了一件旧内衣，同样旧的裤子，等等，这样我看起来就不过分特别了。可这样我就没办法从克帕卡巴纳海滩、太平洋大道上我住的豪华宾馆的门厅里

挥手而出了。所以我总是坐电梯一坐到底，从地下室里出来。

接近狂欢节了，将要举行一场特别的比赛，比赛在几个海滩桑巴学校之间展开——克帕卡巴纳海滩，爱帕尼玛海滩，还有勒巴伦海滩；有三四个乐队，我们是其中之一。我们穿着演奏服，沿着太平洋大道一路走下来。穿着这种花里胡哨的狂欢节服装，我有那么一点儿不自在，因为我不是个巴西人。但我们原本应该打扮成希腊人的模样，因此我琢磨着我和他们一样像希腊人。

在比赛那天，我在宾馆的餐厅里吃饭，领班的服务员，经常看到我一听到桑巴舞曲，就在餐桌上击节以和之，走过来对我说："费曼先生，今天晚上会有你喜欢的事儿！tipico Brasileiro——最具巴西特色：桑巴学校的游行，就从旅馆前边儿经过！这音乐太棒——你可得听听。"

我说："啊哈，我今天晚上有点儿忙。我不知道能不能腾出身来。"

"哎呀！但是你会爱得不得了啊。你千万不可错过！那才是tipico Brasileiro！"

他很固执，我一个劲儿告诉他我想我不会在那儿看的，他大失所望。

那天晚上，我穿上我的旧衣服，跟平时那样从地下室溜出去。在建筑工地那儿，我们披上行头，开始沿着太平洋大道游行，一百个穿着纸做的行头的巴西希腊人，我走在后边，演奏福瑞吉得乐。

太平洋大道两侧，人山人海。大家都把脑袋探出窗外，我们正往米拉玛旅馆那边儿走，我就住那儿。那儿的人都站在桌子椅子上，大家蚁涌蜂攒一般。我们的乐队经过旅馆前边儿的时候，我们一直演奏着，跟20世纪60年代一样疯狂。突然，我看到有个服务员朝天上放枪，他指着我，在这人声鼎沸之中，我听得见他喊："啊，教授！"领班的服务员这才明白，那天晚上我为什么不可能站在那里看比赛——我是参赛的啊。

第二天，我遇到了一个我老在海滩上遇到的女士，她在大道边上有一座公寓楼。她跟几个朋友，高高在上，观看桑巴学校的游行。当我们走过的时候，她的一个朋友喊道："听弹奏福瑞吉得乐的那家伙——他棒啊！"我成功了。没人指望我能做这件事儿，可我硬是做成了。

狂欢节来临的时候，我们学校露面的人却不多。为这一盛事，我们做了一些特别的服装，但现在人却不多。也许他们以为我们不可能胜过城里真正大牌的桑巴学校，我不知道。我认为，我们夜以继日地工作，又是排练，又是游行，都是为了狂欢节。可狂欢节到了，许多队员却不见人影了，我们的实力就不怎么样了。就连我们在街上游行的时候，几个人还半路开溜了呢。结果是这样，真够滑稽！我从来也没搞明白这是怎么回事。也许在海滩上的比赛中出人头地，才是他们主要的兴奋点和乐趣所在，在海滩上，大多数人水平都差不多。顺便说一句，我们乐队

真的赢了。

在巴西待的10个月，我对轻原子核的能价发生了兴趣。我在旅馆房间里把这事儿的全部理论都搞出来了，但我想看看试验数据是怎么样的。这个新玩意儿，就是加州工学院凯洛格（Kellogg）实验室的专家正在搞的东西，我就通过业余无线电跟他们联系——把时间安排好了。在巴西我遇到了一个业余无线电报务员，大约每星期我都到他家里一趟。他和在帕萨迪纳的一个业余无线电报务员进行联系。因为这事儿有点儿非法，他就给了我一个呼号，他说："现在我将把你转给WKWX，他就坐在我旁边，等着跟你说话。"

我就说："这是WKWX。请告诉我硼原子的那些能价间隔，就是我们上星期谈的那个。"诸如此类。我利用试验数据来修正我的常数，并检查我的路子对不对。

头一个家伙去休假了，但他让我到另一个业余无线电报务员那儿去。这第二个家伙是个盲人，他有自己的电台。这两个人都不错，我利用业余无线电和加州工学院之间的联系，很有效率，对我也很有用。

就物理学自身而言，我干的活儿可不少，而且都有道理。后来别人也搞出来了，证实了我的理论。但我觉得，有很多参数需要校准——太多的"关于参数的现象调整"，为的是把一切都弄妥帖——我拿不准这么搞法是不是有用。我想对原子核有更深刻的理解，但始终不相信这是很重要的事儿，所以我对此再也没有进行更进一步的研究。

说到巴西的教育，我的经历相当有趣儿。听我课的那些学生，最后都当老师，因为在那个时候的巴西，在科学方面受过高级训练的人，没有太多的机会。这些学生已经学了很多课程，我教的课是他们在电学和磁学方面的最高级的课程——麦克斯韦方程式之类。

里约大学分散在全城好几座办公楼里，我在一座俯瞰海湾的建筑里上课。

我发现了一个好奇怪的现象：我问一个问题，学生们随口就答得上来。但是，下一次我还是问这个问题——至少在我看来是同一个主题，同一个问题——他们却完全答不上来！比方说，有一次，我在讲偏振光，给了他们一些偏振片。

偏振片只允许电矢在某种方向上的光通过，于是我就向他们解释，看看偏振片是暗的还是亮的，你就能说得出来光是怎么发生偏振的。

我们首先拿起两个偏振片，转动它们，直到它们允许最大量的光通过。我们在这么做的时候，我们说得出来，这两个偏振片允许光在相同的方向上发生偏振——能从一个偏振片通过的光，也能从另一个偏振片通过。但我接着问他们，如果只有一个偏振片，你怎么说得出来偏振的绝对方向呢？

他们茫然无知。

我知道这个问题，是需要一点儿机灵劲儿的，所以我给了他们一点儿提示："看看从外边儿海湾反射过来的光。"

没人说话。

然后我说："你们听说过布鲁斯特角吗？"

"听说过，先生！布鲁斯特角是光在某种介质上的反射角，这种介质的折射率允许光完全偏振化。"

"当光被反射的时候，它的偏振方向如何？"

"先生，光的偏振方向与反射面垂直。"连我自己还得想一想呢，他们却硬生背下来了！他们甚至还知道，那个角度的正切值等于折射率呢！

我说："然后呢？"

仍然默无声息。他们刚刚告诉我，光以一定的折射率从某种介质（譬如外面的海湾这种介质）上反射回来，就成了偏振光。他们甚至连光发生偏振的方向也告诉了我。

我说："看看外面的海湾，透过偏振片来看，现在，转动偏振片。"

"哦哦哦，光发生偏振了！"他们说。

在进行了许多调查之后，我最后琢磨透了：这些学生把什么都死记硬背下来，但那是个什么意思，一概不知。当他们听说"以某一折射率从某种介质上反射回来的光"的时候，他们不知道所谓介质就是水之类的东西。他们不知道"光的方向"就是你看一个东西的时候你朝它看的那个方向，等等。一切都完全是死记硬背的，但没有什么东西被翻译成有意义的词句儿。我问："什么是布鲁斯特角？"找台计算机，把键敲准了就成。但是，如果我说："看看水。"鸦雀无声——"看看水"这话隐藏着什么意思，他们莫名其妙。

后来，我在工学院听他们的课。课的上法，翻译成英语，是这样的："两个物体……是相等的……如果力矩相等……将产生出……相等的加速度。两个物体，是相等的，如果力矩相等，将产生出，相等的加速度。"学生们坐在那儿，记录口述。趁着教授重复句子的当口，检查是不是记得正确。然后，他们记第二个句子，再记，再记。明白教授正在讲的是具有相同惯性矩的一些物体的，我是唯一的一个，而他讲的相当难琢磨。

我看不出他们怎么能这样学到任何东西。现在，他在讲惯性矩，但

没有下面这种讨论：你把重物抵在门的另一边，你推门有多么费力。比较一下，你把重物放得靠近合叶一些，又如何——完全没有这种东西！

下课后，我对一个学生说："你把笔记都记好了——笔记有什么用？"

"哦，我们研究笔记，"他说，"我们要考试的。"

"考试，是怎么个考法？"

"非常容易。我现在就可以告诉你一个试题。"他看着他的笔记本说，"'在什么时候两个物体是相等的？'答案是：'两个物体是相等的，如果它们的力矩产生了相同的加速度。'"您看，大家都能通过考试，都能"学会"这些玩意儿。除了他们背诵下来的东西之外，他们什么也不知道。

以后，我又看了工学院的入学考试。那是个口试，我得到允许，可以旁听。有个学生，绝对超一流：一切问题，对答如流！主考问，什么是反磁性，他回答得很完美。主考又问："光以一定角度穿过有一定厚度的材料板，折射率为N，光有什么变化？"

"先生，它出来的时候，与自身平行——位移。"

"位移了多少？"

"我不知道，先生，但我能算出来。"他果真算出来了。他很优秀。但到那个时候，我仍然疑心重重。

考试之后，我走到这个聪明的年轻人那儿，我告诉他，我是从美国来的，我想问他几个问题，而且我这么问，无论如何不会影响他的考试成绩。我问的第一个问题是："你可以举出几个抗磁性物质的例子吗？"

"不能。"

然后我问："如果这本书是玻璃做的，我透过它看桌子上的什么东西。如果我把这块儿玻璃倾斜起来，那么物像会有什么变化？"

"它会偏斜的，先生，会偏到你转动这本书的角度的两倍。"

我说："你没把它和镜子弄混了，是吧？"

"没弄混，先生！"

刚才在考试的时候，他告诉我们说，光线会位移，与自身平行，因此物像会移到一边儿去，但不会以任何角度转动。他甚至计算出了物像会移动多少，但他没意识到一块儿玻璃就是有折射率的材料，没意识到他的计算本来就适用于我的问题。

我在工学院开了物理学的数学方法这门课，讲课过程中，我试图表明如何用试错法来解决问题。这东西，大家通常都不知道，于是我就开始用一些简单的算术例子，来演示这个方法。80来个学生当中，只有8个完成了第一次作业，这让我很吃惊。因此，我在上课的时候特别强调，要真的去试试，不要作壁上观，不要只看我做。

这节课下了之后，几个学生，组成了一个小代表团，来找我，告诉我说，我不理解他们的背景，说不必搞这些问题照样学习，说他们已经学过算术，说这些东西都在他们的水平之下。

我就继续教这个班，而且无论学的东西多么复杂，或者无论多么明显的高级，他们从来就没交过什么鬼作业。我当然知道那是怎么回事：他们做不了！

我没能让他们做成的另一件事儿，是提问。最后，一个学生对我解释说："如果在上课的时候我问您问题，过后大家都要对我说，'你干吗在课上浪费我们的时间？我们想学点儿什么，可你问问题，不让他讲。'"

这是一种先声夺人的坏作风，明明是谁也不明白在讲的东西是什么，可他们把一个人打压下去，就好像他们真明白似的。他们都假装明白，如果有个学生有那么一刻承认什么东西把他搞昏头了，提出一个问题，其他的人就采取高人一等的态度，那做派就好像没什么东西不清楚似的，告诉那个学生他在浪费别人的时间。

我对他们解释，在一起研究、讨论问题、把想法说个畅快彻底，这办法是多么有用。但他们连这个也不做，因为问了别人，就丢了面子。这太可悲了！他们出力不少，人也聪明，但却使自己陷入了这么一种滑稽的精神状态，这种奇怪的、自体繁殖式的"教育"，没意义，完全没意义！

学期结束之际，学生们要我发表一个讲话，谈谈我在巴西的教学经历。讲话的时候，在场的，不光是学生，还有教授，有政府官员，因此我要求他们做出允诺：我想说什么，就说什么。他们说："没问题，当然。这是个自由国家嘛。"

我就这么进来了，带着大学第一学期他们用的那本基础物理课本。他们认为这书特别好，因为它是用不同字体印刷的——粗黑体，意思是最重要的东西，得记住；颜色浅的，不那么重要，诸如此类。

立刻就有人说："你不会说这书的坏话，是吧？写这书的人，在这儿呢，而且，大家都认为这是本很好的书。"

"你们答应过我，我想说什么，就说什么。"

讲座大厅座无虚席。我给科学下了个定义，以此作为开场白，我

说，科学是对自然的行为的理解。然后，我问：“为什么教科学？站得住脚的好理由是什么？当然，没哪个国家，能自称自诩是一个文明的国度，除非……”啰里啰唆，啰里啰唆。在座的人，频频点头，因为我就知道，他们就是这么个看法。

然后，我说：“这么想，是荒唐的，当然荒唐，因为，我们有什么必要觉得自己必须得跟上另一个国家的脚步？我们搞科学，应该有个站得住脚的理由，一个不那么傻里傻气的理由，而不是因为别的国家也搞科学。”然后，我讲到了科学的功用，以及科学在改善人类状况方面所做出的贡献，诸如此类——实际上，我这是在逗他们呢。

然后，我说：“我讲话的主要目的，是想向诸位表明：巴西没教什么科学！”

我看得出，他们都燥热起来，他们在想：“什么啊？没教什么科学？这绝对是痴人说梦！科学课程，我们都有嘛。”

于是，我告诉他们，在我刚来巴西的时候，使我颇受震动的头几件事当中，有一件，是小学生在书店里买物理书。在巴西，有这么多孩子在学物理，比美国孩子起步早得多。可你在巴西找不到许多物理学家，这事儿透着怪——这是怎么搞的？这么多孩子，这么努力地学，却没什么收效。

然后，我用一个希腊学者来打比方，这个希腊学者热爱希腊语，他知道，在他自己的国家中，没有多少孩子学希腊语。但来到了另一个国家，他欣喜地发现，大家都在学希腊语——连小学里的小孩子也在学。他去为一个要在希腊语方面拿学位的学生当考官，问他：“关于真与美之间的关系，苏格拉底有些什么看法？”——这学生答不上来。然后，他问这个学生：“在《第三篇对话》中，苏格拉底对柏拉图说了什么？”这个学生眼睛一亮，率尔答曰：“吧啦吧啦吧啦”——口若悬河啊，苏格拉底说的什么，他都告诉你了，一字不差啊，用漂亮的希腊语说的！

但是，在《第三篇对话》中，苏格拉底谈的那些东西，就是真与美之间的关系啊！

这位希腊学者发现，另外这个国家的学生，学希腊语，先是学字母的发音，然后学词儿，然后学句子和段落。苏格拉底说的什么，他们背得下来，一字不差地背，却没有意识到那些希腊词儿，实际上意味着某种东西。对学生而言，那些词儿，全是做作出来的声音。没人把那些词儿翻译成学生能够理解的词儿。

我说：“在我看到你们在巴西教孩子们‘科学’的时候，在我看来，就是这个样子。”（好强的冲击波，是吧？）

然后，我把那本他们正在用着的基础物理课本举在手里。“在这本书中，在任何地方，都没提到任何实验结果，有个地方例外，那儿有个

球，正在滚下斜面，在那个地方，书里说，在1秒、2秒、3秒、多少多少秒之后，这球滚出多远。这些数字有‘误差’——就是说，如果你看这些数字，你还当是在看实验结果呢，因为这些数字，比理论上的数值大一点儿或小一点儿。这书甚至谈到了必须纠正实验误差的问题——这很好。问题是：如果你根据这些数值来计算加速度常数是多少的话，你可以得到正确的答案。但是，一个沿着斜面向下滚的球，如果你真动手让它滚的话，它还有惯性，这惯性让它转动，如果你真做这实验的话，你将得到正确答案的5/7，因为需要额外的能量消耗在转动上。因此，这唯一一个实验‘结果’的例子，还得自假实验呢。没人曾经滚过球，否则他们不可能得到那种结果！”

“我还发现了另外一件事儿，”我继续说，“随便翻到哪一页，随便把我的指头按在哪儿，然后读我按住的那个句子，我可以向诸位表明，我说的是怎么一回事儿——它怎么就不是科学，而是死记硬背，整本书都是如此。因此，我敢说，现在我随便翻到哪一页，当着在座各位的面，我用手指头按到这儿，给你们读这句话，让诸位自己看看。”

我就这么办了。扑啦扑啦扑啦——我指头按住一个地方，我开始读：“摩擦发光。摩擦发光是晶体摩擦时发出的光……”

我说：“就在这儿，你们看到科学了？没有！你们只是用另一些词儿来告诉一个词儿是什么意思。你们没说到自然——你摩擦晶体发光，你摩擦的是什么晶体，为什么它们会发光？你们看到过有任何学生回家去试试这个吗？他没法儿试。”

“但是，如果你这么个写法，‘你拿着一块儿糖，在黑暗中用钳子夹它，你可以看到蓝莹莹的闪光。其他一些晶体也是如此。没人知道这是为什么。这种现象叫作摩擦发光。’然后呢，有人就会回家去试了。然后呢，这就有了一个关于自然的体验。”我用这个例子来说明问题，我的指头按住书的什么地方，无关紧要。这种例子满篇皆是。

最后，我说，我可看不出任何人怎么可能从这种自体繁殖式的体制中受到教育，在这种体制中，大家考试过关，再去教别人考试过关，但没人理解任何东西。“然而，”我说，“我必定说错了。我班上有两个学生，做得不赖。我认识的一位物理学家，完全是在巴西受的教育。因此，这体制坏是坏，可有些人倒也有可能在其中走出一条路子来。”

这下可好了，我话讲完了，科学教育部门的一个负责人，站起来说：“费曼先生刚才对我们讲了一番逆耳之言啊。看来他是真正热爱科学啊，他的批评也是诚恳的。因此，我认为我们应该听他的。我到这儿来，已经知道我们的教育体制有病在身，我现在才知道，我们是得了癌症啊！”——他坐下了。

这使别人得到了畅所欲言的自由，大家情绪高涨。大家都站起来提建议。学生们事先组成了一个什么委员会，把我的讲稿油印了出来，他

们也让别人组成委员会，来做这样那样的事情。

接下来发生的事儿，我完全没想到。一个学生站起来说：“我就是费曼先生在他的讲话末尾提到的那两个学生中的一个。我不是在巴西受的教育，我是在德国受教育的，我只是今年才到了巴西。”

另一个在班里干得不赖的学生，也说了相似的事儿。我提到的那位教授，也站起来说：“在战争期间，我是在巴西接受教育的，在那时，幸运的是，教授们都已经离开了这个大学，因此我学到的全部东西，都是我自己读来的。因此，我实际上不是在巴西的体制下接受教育的。”

这个，我可没想到。我知道这个体制坏，但现在它是100%的坏——这可太糟糕了！

因为我是在美国政府的一个项目的赞助下到巴西的，美国教育部要我写一个报告，谈谈我在巴西的经历，所以把我刚才的这个讲话的主要内容也写进了报告。后来，通过小道消息，教育部某人对此的反应是：“你该明白了，把这么一个幼稚的人派到巴西，有多么危险。傻乎乎的家伙，他只能制造麻烦。这里面的问题，他不明白。”恰恰相反！教育部这主儿，看到一个大学开了课程列表，什么都说得天花乱坠，就把这当真事儿，我觉得，他才幼稚。

什么话都会说

在巴西的时候，我玩命学当地语言，拿定主意用葡萄牙语讲物理课。我一回到加州工学院，就得到邀请，参加巴舍尔（Bacher）教授做东的聚会。我到场之前，巴舍尔告诉客人：“费曼这个家伙，学了几句葡萄牙语，就自以为聪明，我们修理修理他。史密斯太太，就这位（百分之百的白人），在中国长大。我们让她用中国话跟费曼打招呼。”

我被蒙在鼓里，溜达着来参加聚会。巴舍尔把我引荐给这些人：“费曼先生，这位是什么什么先生。”

“请来会会费曼先生。”

“这位是什么什么先生。”

“幸会，费曼先生。”

“这位是史密斯太太。”

“哎，您好！”她说，还鞠躬。

我吓了一跳，我琢磨着，只好以同样的派头作答了。我礼貌地向她弯弯腰，信心十足地说：“啊，垒好！”

“哦，我的上帝！”她叫起来，自己倒绷不住了。“我就知道会这样——我说普通话，他说广东话啊！”

照您吩咐的，老大！

每个夏天，我常常开车横穿美国，想开到太平洋边儿上。但因为各种各样的原因，我总卡在什么地方——通常是拉斯维加斯（Las Vegas）。

我特别记得我第一次到那儿，我非常喜欢那次的经历。当时和现在一样，拉斯维加斯从赌徒那儿赚钱，因此，旅馆唯一的问题，就是把大家弄到这儿赌博。因此，旅馆里有表演，有饭，都非常便宜——和白看白吃差不多。什么都不需要你预定：你可以迈步进去，找一张空桌子，坐下，欣赏演出。对一个不赌博的人来说，这事儿太妙了——房间不贵；饭，简直不花钱，表演不错，女孩儿我喜欢。

有一天，我躺在旅馆的游泳池边儿上，有个家伙走过来，开始跟我搭话儿。我忘记他是怎么跟我聊上的，但他以为我想必是个靠工作活命的人，而这实在是相当愚蠢的。“你看我活得多潇洒，”他说，“我成天在游泳池边上流连忘返，在拉斯维加斯优哉游哉。”

“你不干活儿，怎么还活得这么滋润？”

“简单：我赌马。”

“我对马一窍不通，但我看不出，你怎么能靠赌马过日子。”我满腹狐疑地说。

“当然能，”他说，“我就是这么过日子的！我告诉你是怎么回事儿：我教教你怎么弄这个事儿。待会儿我们去赌一把，我保证你赢100块。”

“你怎么弄的？”

“我赌100块，赌你赢，”他说，“这样的话，如果你赢了，你一个大子儿也不用出；如果你输了，你就赢我100块！”

我就想了，“嚯！那好啊！如果我在赛马上赢100块，那就给他了，我不损失什么。权当练练手——那就证明他那套管用。如果他输了，我就赢他100块。这很妙！”

他带我到了一个赌马的地方，那里列着马的名字和全国各地赛马场的名字。他把我介绍给另外一些人，他们说：“嚯，他很了不起！我赢了100！”

我逐渐意识到，我必须押上我自己的一些钱才能赌，我开始有点儿

紧张了。“我必须赌多少钱？”我问。“哦，三四百吧。”我没那么多钱。再说，这事儿让我着急了：要是我输了呢？

于是他说：“我告诉你这是怎么回事儿，我的建议只花你50块，如果这主意灵验，我就给你100块，你横竖都是赢嘛。”我琢磨着，“哇！这样我两头儿都赢——不是赢50，就是赢100！这主儿怎么能这么办？”稍后，我明白了：如果你输赢机会平均的话——把听他建议以便理解其中的奥妙所付出的小小损失暂且忘掉——那么你赢100块的机会比你输400块的机会是四比一。因此，他在某个人身上试这一招儿，试五次，他就有四次赢100块，他就能赢200块顾问费（他还要向他们说明白自己是多么聪明）；到第五次，他必须付出100块。因此平均来说，他每付出100块，就能得到200块！因此，我终于明白了他是怎么弄的。

这个过程持续好几天。他设计出了一个乍听起来非常合算的方案，但等我思考了一阵子之后，我慢慢琢磨出了这是怎么弄的。最后，他有点儿气急败坏地说，“好了，我告诉你这是怎么回事儿：你给我50块买建议，如果你输了，我就把你的钱全还给你。”

现在，我想输都输不了了！因此我说：“好吧，成交！”

“好，”他说，“但不凑巧，我这个周末得去旧金山一趟，你把结果寄给我得了，如果你把你那400块输掉了，我会把钱寄给你。”

他的前几个方案，设计出来，是凭诚实的数学计算为他赚钱的。现在，他却要出城了。他拿这个方案赚钱的唯一办法，是不把钱寄过来——当个真正的骗子。

因此，我从来没有接受他任何建议。但看明白他怎么操作这一套，堪为乐事。

拉斯维加斯的另一乐事，是认识表演的女孩儿。我猜，她们是在表演之外的空闲时候，挂在酒吧里拉客的。我这么见了她们好几个，跟她们聊天，发现她们人都很好。“表演女郎，哦？”这么说话的那些人，对她们有先入之见！可在任何人堆儿里，如果你看仔细了，那就什么样的人都有。比方说，东海岸一个大学里的一个院长的女儿，就在那儿。她有舞蹈天赋，喜欢跳舞，放暑假了，跳舞的工作难找，于是她就到拉斯维加斯，在一个歌舞团里找了个工作。大多数表演女郎人都很好的，很友好。她们都很漂亮，而我就是爱漂亮女孩儿。说穿了，表演女郎是我如此喜欢拉斯维加斯的真正原因。

起先，我有点儿害怕：这些女孩儿也太漂亮了，她们有怎么怎么样的名声，等等。我就想办法跟她们见面，我说话的时候，呼吸都有点急促呢。刚开始的时候，很难；但是，渐渐地，事儿容易了，最后我信心十足，不怵任何人。

我有我自己的冒险路数，这路数很难解释的：那好像是钓鱼。你把

线放出去，然后呢，你需要点儿耐心。当我对人家讲起我的一些冒险经历的时候，他们或许会说：“哦，来啊——我们干这个去！”于是我们就去了一个酒吧，看看能不能弄出点儿事儿，可20来分钟，他们就不耐烦了。平均而言，要想弄出事儿，你得等上几天。我花费了许多时间来跟表演女孩儿聊。一个女孩儿把我介绍给另一个，过了一阵子之后，有意思的事儿就常常会发生。

我记得一个喜欢喝吉普森酒的女孩儿。她在“火烈鸟旅馆”跳舞，我跟她很熟。我进城的时候，不等她坐下，我就给她要一杯吉普森，放在她桌子上，以此宣布我大驾光临。

有一次，我进来，坐在她身边儿，她说：“我今天晚上要和一个男人在一块儿——得克萨斯州的一个阔佬。”（我早就听说过这家伙。每当他玩儿双骰子的时候，大家都凑过来看他赌。）在他回到我们坐的这桌子的时候，我的表演女孩儿把我引荐给了他。

他跟我说的头一句话是：“你可知道？昨儿晚上我在这儿输了6万美元。”

我知道怎么应对，我脸朝向他，完全无动于衷，说：“你觉得，那是聪明，还是愚蠢？”

我们正在餐厅里吃早饭。他说：“听着，让我来替你签单。这些东西，他们从来不要我钱，因为我在这儿赌得太多了。”

“我有的是钱，用不着操心谁来给我付早饭，谢谢。”他每次想给我摆阔，我都不买他的账。

他什么招数都用：他有多么富，他在得克萨斯州有多少石油。没一样儿灵的，因为我知道这种套路！

到最后，我们一道儿找了不少乐子。

有一次，我们两个坐在酒吧里，他说：“你看那边儿那桌儿，那些妞儿？她们是从洛杉矶来的婊子。”

她们相貌非常漂亮，是有一定级别的呢。

他说：“告诉你我要干什么。我会把她们介绍给你，然后呢，你挑一个，我来付钱。”

我不觉得我想见这些女孩儿，我也知道他说这个，是为了给我摆阔，于是我就对他说不。可我转念一想，“这里头有事儿！这家伙不遗余力跟我摆阔，还要为我买这个。如果我将来讲起这档子事儿……”于是我就对他说，“那个，好吧，为我引荐。”

我们凑到她们那桌儿，他把我介绍给那些女孩儿，然后就暂避一边儿了。一个女服务员过来了，问我们想喝点儿什么。我要了些水，坐我旁边的那女孩儿，“我来杯香槟好吗？”

“你要什么都成，”我冷冷地回道，“你自己买，谁管得着。”

“什么毛病啊，你？”她说，“小心眼儿还是怎么着？”

“随你怎么说。”

“你真不够绅士！”她义愤填膺地说。

“你真是一眼把我看了个透！”我回嘴。鄙人以前在新墨西哥州学习过，学习不当绅士。

很快很快，她们倒主动给我买喝的——真是乾坤颠倒啊！（顺便说句，得克萨斯的那位卖石油的，一去不回头了。）

过了一阵子，其中的一个女孩儿说：“我们到埃尔兰乔（El Rancho）去吧。说不定那儿现在事儿热闹了。”我们进了她们的车。车不错，人也不错啊。在路上，她们问我名字。

“迪克·费曼。”

“你打哪儿来的，迪克？你干什么的啊？”

“我是从帕萨迪纳来的，在加州工学院工作。”

有个女孩儿说：“哦，那不是那个科学家鲍林[52]待的地方吗？”

我反反复复到过拉斯维加斯好几次，但那儿没人知道科学的事儿。我曾经和一个商人谈过各种各样的事儿，对他们而言，一个科学家，什么也不是。“没错儿！”我说，心里惊讶。

“有个叫盖伦还是什么玩意儿的家伙——是个物理学家。”简直难以置信。我坐的这个车，满车的妓女，都知道这类事儿！

“是啊！他名叫盖尔曼[53]！你怎么凑巧知道？”

“你们的照片都上《时代》周刊了啊。”这不假，《时代》周刊里常有美国科学家的照片，不知什么原因，我也进去过，还有鲍林和盖尔曼。

“你怎么记得住那些名字啊？”我问。

“哈，我们从照片里找最年轻漂亮的！”（盖尔曼比我年轻。）

我们到了埃尔兰乔旅馆，女孩儿们继续跟我玩儿大家通常跟她们玩儿的那一套游戏：“想赌一把吗？”她们问。我用她们的钱赌了一点点儿，我们玩儿得很开心。

过了一阵子，她们说：“好了，我们看到你这个大活人了，现在不得不把你撇下了。”她们回去工作了。

有一次我坐在酒吧里，我注意到两个女孩儿和一个老头儿在一块儿。最后，老头儿走了，她俩就凑到我这儿来坐下：比较漂亮、比较活跃的那个，挨着我坐，她那位木讷的朋友，叫潘，坐在另一边儿。

事儿一开始就进行得很顺利。她非常和气。一会儿工夫，她就靠在我身上，我呢，把一只胳膊搭在她肩上。进来两个男的，坐在近旁的桌子那儿，然后，女服务员还没来得及过来，这两位却出去了。

“你看见那两男的了吗？”我的新朋友说。

“看见了。”

“他们是我丈夫的朋友。”

“哦？怎么回事儿？”

“你知道，我刚刚和约翰老大结了婚”——她提到的是一个如雷贯耳的名字——“我们拌了几句嘴。我们这是度着蜜月呢，可约翰总在赌。他不把我放在眼里，那我就出去找我的乐子去，可他总是派特务来转悠，看看我在干什么。”

她要我把她送到她的汽车旅馆的房间里，于是我们就上了我的汽车。在路上，我问她：“那个，约翰怎么办？”

她说，“别担心。看看周围有没有个大红汽车，有两根儿天线的。要是你没找到，那他就不在附近。”

第二个晚上，我带着这位“喜欢吉布森鸡尾酒的女孩儿”和她的一个朋友，去看“银拖鞋旅馆”的晚场表演，那儿的表演比别的旅馆都晚。在别的地方表演完了的女孩儿，都喜欢到那儿去。各种各样的舞女进门的时候，节目主持人就报奏她们大驾光临。因此，当我两只胳膊上挎着两位可爱的舞女款款入场的时候，他说道：“从火烈鸟来的什么什么小姐和什么什么小姐大驾光临！”大家都扭头看这是谁来了。我感觉自己好伟大！

我们找了张靠近吧台的桌子，坐下来，过了一会儿，起了一阵子小小的慌乱——服务员拉桌子，几个保镖登堂入室，还带枪呢。他们在为名人腾地方呢。约翰老大，大驾光临！

他走到吧台那儿，与我们这桌子挨着，立刻有两个家伙想和我带来的这两女孩儿跳舞。她们去跳舞，我一个人守着桌子坐着，这时，约翰走过来，坐在我这桌儿上。“还好吗？”他说。“你在拉斯维加斯，干嘛来着？”

他准是发现我和他老婆的什么事儿了。“鬼混呗……”（我得硬气点儿，对吧？）

“你，在这儿鬼混了多少日子？”

“四五个晚上吧。”

“我认得你，”他说，“在佛罗里达，我见过你吗？”

“这个嘛，鄙人确实不知……”

他问这个地方，问那个地方，不知道他葫芦里卖的什么药。“我知道，”他说，“那是在艾拉摩洛哥的事儿。”（艾拉摩洛哥是纽约的一家大夜总会，许多大玩家都去的——比方说理论物理学教授什么的，对吧？）

“一定是在那儿了。”我说。我在想，他到底什么时候才能翻开底牌。最后，他朝我倾过来，说，“嗨，你能不能把我引荐给跟你在一块儿那两女孩儿，等她们跳完舞？”

他想要的是这个啊，原来他根本不认识我！于是我就想引荐他，但我的表演女孩儿说她们累了，想回家。

第二天下午，我在火烈鸟旅馆看见了约翰老大。他站在吧台边儿，跟服务员聊照相机，还拍照片呢。他想必是一个业余摄影家了：闪光灯和照相机，他有一大堆；但他说的那些话，却傻瓜透顶。我断定他根本不是个业余摄影家，他不过是个有钱的主儿，买了几个照相机而已。

到那时候，我琢磨清楚了，他并不知道我一直在跟他老婆鬼混。他跟我说话，只是为了那两女孩儿。于是我就想玩儿个游戏，我为自己设计了个角色：约翰老大的随从。

“嗨，约翰，”我说，“拍几张照片吧。我替你拿着闪光灯。”

我把那些闪光灯装在口袋里，我们就出发去拍照片了。我在把闪光灯递给他的时候，时不时地给他点儿建议。他喜欢这路事儿。

我们到了“前线旅馆”去赌，他开始赢了。旅馆都不喜欢赢家离开，但我看得出他想走。问题是，怎么走才不失风度。

“约翰，我们现在必须得走了啊。”我说，语气严重。

“可我赢着呢。”

“知道你赢着，可我们今天下午不是有个约会吗？”

“那好吧，备车。”

“照您吩咐的，老大！”他把钥匙递给我，告诉我车是什么样子。（我没让他知道我早知道他车是什么样子。）

我出去，到了停车场那儿，果然，那儿有一部大胖车，漂亮透了，还有两根儿天线。我爬到里边儿去，转动钥匙——启动不了。这车有个自动打火器。这玩意儿刚出来，我一点儿不懂。折腾了一阵子，我碰巧把钥匙转到了“打火”上，起来了。我小心翼翼地把这辆百万美元的车，开到旅馆门口儿。我下了车，到里面那桌子，他还在赌呢，我说，“车预备好了，先生！”

“恕不奉陪了。”他宣布，我们离开。他让我开车。“我想去埃尔兰乔，”他说，“那儿的女孩儿，你认得吗？”

那里有个女孩儿，我很熟，我就说“认得啊”。到那时候，我拿得准，他跟我玩儿我发明的这个游戏，唯一的目的，就是会女孩儿，所以我提出了一个敏感话题：“有天晚上，我见着你老婆了……”

“我老婆？我老婆不在拉斯维加斯这地方。”我就把我在酒吧遇到那个女孩儿的事儿，告诉了他。“哦！我知道你说的是谁了。我在洛杉矶那儿，见到那个女孩儿和她朋友，就把她们带到拉斯维加斯这儿来。她们干的头一件事儿，就是用我的电话，给得克萨斯州的朋友打电话，打了一个钟头啊。我气坏了，就把她们给轰了出去！她就到处告诉大家，说她是我老婆，呃？”因此，这事儿，算是澄清了。

我们到了埃尔兰乔，大约15分钟，表演就开始了。这地方人多，屋子里没座位了。约翰就到总监那儿，说：“我，需要张桌子。”

“好的，先生！几分钟就给您预备着。”约翰给了他小费，转身去赌了。同时，我转到后边去，女孩儿们都在那儿为演出做准备呢，问我的朋友在不在。她出来了，我跟她说，约翰老大跟我在一块儿。演出之后呢，他需要有人陪陪。

“没问题，迪克，”她说，“表演完了，我带几个朋友过来见你。”

我转到前面来找约翰老大，他还在赌。“你先一个人进去，”他说，“我随后就到。”

有两张空桌子，在紧前头，紧贴着舞台边儿。别的桌子，都满满的。我自己一个人坐下。就在开演之前，约翰进来了，表演女孩儿就出场了。她们看得见我就坐在这张桌子那儿，一个人儿坐着。还没等她们

来得及以为我不过是个偶尔来玩玩儿的教授，现在她们该明白，我是一个大赌家啊。

最后约翰进来了，很快几个人就占了我们旁边儿那桌子——约翰的“老婆”和她朋友潘，还有两个男的！

我倾过身去，对约翰说：“她在那张桌儿那儿。”

“是啊。”

她看到我在照顾约翰，所以她就从另一张桌子那儿侧着身子问我：“我可以和约翰说几句话吗？”

我一言不发，约翰也一言不发。

我等了一会儿，然后，我倾过身去，对约翰说：“她想跟你说话。”

然后，他稍作沉吟。“可以。”他说。

我等的时间还长点儿，然后向她侧过身：“现在，约翰要对你讲话。”

她走到我们这桌儿来，开始卖弄她那套“翰翰”，坐得离他也太近了。我看得出来，事情还是稍微缓和了一点儿。

我喜欢搞点儿恶作剧，所以，每当他们有所缓和的时候，我就提醒约翰点儿事儿：“电话啊，约翰……”

“是啊！”他说，“打我电话，打一个钟头，什么意思啊？”

她说，打电话的是潘。

事儿又缓和了一点儿，于是我指出，把潘带到这儿，可是她的主意。

“是啊！”他说。（我玩儿这个游戏，玩得好开心，这么玩儿了好一阵子。）

到表演结束的时候，埃尔兰乔的女孩儿们来到我们这桌儿，我们跟她们聊，直聊到她们不得不去演下一场。然后，约翰说，“我知道一个不错的小酒吧，离这儿不远。我们到那儿走一遭。”

我开车把他送到那个酒吧那儿，我们进去了。“看到那边儿那姑娘了？”他说，“她实在是个好律师。过来，我给你引荐引荐。”

约翰为我们做了介绍，找了个借口，去了洗手间。他一去不回头。我以为他还回来跟他“老婆”重修旧好呢，那样我就再开始捣乱。

我对那姑娘说“嗨”，为我自己点了一杯喝的。（我玩的还是那一套：不在乎别人怎么看，不想当绅士。）

“你可知道，”她对我说，“在拉斯维加斯，在律师当中，我是数得着的。”

“哦，数不着，数不着你，”我淡淡地回答，“在大白天的时候，你或许是个律师。但是，现在，你知道你是个什么东西？你不过是在拉斯维加斯的小酒吧里鬼混，如此而已。”

她喜欢我，我们到了好几个地方跳舞。她舞跳得真不赖，我呢，爱跳舞，所以我们在一块儿玩儿得很开心。

接下来，正跳着舞呢，冷不丁地，我后背疼起来。那是一种剧痛，而且来得突然。我现在明白那是怎么回事儿：一连三天三夜，我搞这些疯狂的冒险，我是彻底虚了。

她说，她要把我带到她家去。我一钻到她床上，就昏睡过去。

第二天早晨，我在这张漂亮的床上醒来。窗外阳光灿烂，却不见她的踪影，只有一个女仆在那儿。“先生，”她说，“您醒了啊？早饭给您预备好了。”

“那个，呃……”

“我给您拿去。您喜欢吃什么？”她把整张早餐菜谱念了一遍。

我点了早饭，在床上吃了——在一个素昧平生的女人的床上。我不知道她是何许人，不知道她从哪儿来。

我问了这女仆几个问题，可她对这个神秘的女人，也是一无所知：她刚刚被雇到这儿，这是她上班的第一天。她还以为我是这家的男主人呢，我倒问她问题，这叫她好生纳闷。我穿好衣服，最后离开了。我再也没有见到这个神秘的女人。

我第一次到拉斯维加斯的时候，就坐下来把各种赌博的概率都算出来了，我发现掷骰子的概率是0.493的样子。如果我赌1块钱，只需要花费我1.4分钱。于是，我心里想，“为什么我这么不情愿赌？这几乎不花什么钱啊！”

于是我就开始赌，一眨眼，我就一口气输了5块钱——1块，2块，3块，4块，5块。我本来以为只会输7分钱，但我输了5块啊！我从此以后再也没赌过（我是说，没用自己的钱赌）。才一试手，就输，我很幸运。

有一次，我和一个表演女孩儿一块儿吃午饭。下午这个点儿，静悄

悄的；不像别的时候那样，人都急匆匆地。她说：“看那边儿那主儿，正穿过草地的那位？那是‘希腊人尼克’，一个职业赌棍。”

我已经对拉斯维加斯的全部赌博概率了如指掌，我就说：“他们怎么能够拿赌博当职业呢？”

“我喊他过来。”

尼克过来了，她为我们做了介绍。“玛丽莲说你是个职业赌家。”

“她说得没错儿。”

“那个，我想知道，你靠赌博过日子，这怎么可能，因为在赌桌上，胜算是0.493。”

“你说得对，”他说，“我会给你讲明白。我不在桌子上赌，也不干任何那类事儿。我只是在机会对我有利的时候才赌。”

“啊？什么时候机会对你有利啊？”我满腹狐疑地问。

“实际上很容易，”他说，“我在桌子边儿站着，等有个家伙说，‘我要9点，它就来9点！’这家伙兴奋了。他以为那会是9点，他想赢。可我知道全部数字的概率，于是我就对他说，‘我以4块赌你3块，我赌不是9点，’时间长了，我会赢。我不在桌子上赌，我和在桌子上玩儿的那些心存偏见的人赌——他们迷信幸运数字。”

尼克继续说：“既然我现在已经名声在外，事儿就更容易了，因为大家甚至在知道概率不很有利的时候，也还是要和我赌，只为有机会跟大家讲怎么打败希腊人尼克，这得在他们赢了的时候才成。因此，我真的是靠赌博过日子的，很好玩儿啊！”

因此，希腊人尼克真是个受过教育的人。他人很好，很有魅力。我感谢他为我解释这事儿。现在我明白了。我一定要理解这个世界，你知道。

盛情难承

康奈尔大学什么系都有，但我兴趣都不很大。（这意思，不是说这些系有什么毛病，是我碰巧对这些系不感兴趣而已。）有家政学，哲学（这个系的家伙，脑袋尤其空），还有文化的东西——音乐之类。当然，跟我言语投机的人，还真有几个。数学系有凯克（Kac）教授和菲勒（Feller）教授；化学系，有加尔文（Calvin）教授；动物学系还有个很了不起的家伙，就是格里芬（Griffin）博士，发现蝙蝠用回声导航的，就是他。但要找到足够多的这类谈话对手，难。但低水平的信口雌黄，却有的是。

天气也实在不佳。有一天，我正开着车，没想到天上急匆匆地下起雪来，你没防备这个，你就琢磨：“哦，不会下得太大吧。我继续开得了。”

可那雪接着就厚起来，车开始有点儿打滑，所以你不得不用防滑链。你从车里出来，把链子铺在雪地里，链子冰凉啊，你也开始瑟瑟发抖了。然后，你把车倒在链子上，你麻烦来了——或者说，那年头儿，我们就有这个麻烦。下雪的时候，我不知道怎么办了——里头有个链子，你必得把这个链子先钩住。因为链子必须扣得很紧才成，让钩子钩住链子，就难了去了。然后，你不得不用手指头，把这个夹子扳下去，到这时候，你的手几乎冻僵了。因为你在车胎的外头，可钩子在里头，你的手又冻僵了，要把事儿办妥，太难了。链子总是滑掉，链子还冰凉，雪又下得紧，你想把这个夹子扳下去，你的手冻得好似冰棍，可这倒霉玩意儿就是不下来——好了，我记得就是那个时刻，我想明白了：这是犯傻。世界上必定有个地方，没这种麻烦。

我记得我去过几次加州工学院，巴舍尔（Bac-her）教授请我去的，他早先在康奈尔大学。我去访问的时候，他很机灵。他对我太了解了，于是他说，“费曼，我有辆车，用不着，我想把它借给你。现在你就可以去好莱坞和日落大道（Sunset Strip），好好玩儿。”

于是，我每天晚上就开着这车到日落大道去——去夜总会，去酒吧，去看表演。都是拉斯维加斯的那种我喜欢的东西——漂亮女孩儿、大赌家之类。巴舍尔知道怎么使我对加州工学院发生兴趣。

一头驴，不偏不倚站在两堆干草正中间，不知道到哪边儿去，因为两堆干草完全一样，这故事，你知道吧？呵，不知道就算了。康奈尔大学和加州工学院开始给我提供条件，我琢磨着加州工学院比较好，正当我开始动身的时候，康奈尔那边儿就加码了；到我觉得留在康奈尔的时候，加州工学院那边儿又加了点什么好处。因此，你能够想象得到，两堆干草中间的这头驴，只是情况更复杂，他刚要到一边儿去，另一边儿就高了一点儿。这真叫人左右为难！

最后把我说服气了的一个论点，是我的休假年。我还想到巴西去，这次是10个月，我刚刚在康奈尔大学获得了休假年。我不想失去休假年，因此现在我就发明了一个理由，好做出决定，我就写了封信给巴舍尔，告诉他我做出了什么决定。

加州工学院回信：“我们将立刻聘请您，您的第一年就是休假年。”他们就是这么个搞法：无论我决定怎么做，他们都死叮住你不放。因此，我在加州工学院的第一年，实际上是在巴西度过的。我在第二年才到加州工学院教书。事儿就是这么个事儿。

我从1951年就一直在加州工学院了，我在那儿一直很开心。这个学校，正合我这种偏执的家伙的口味儿。那儿有的是顶尖级的人物，对自

己干的事儿都很感兴趣，我也跟他们谈得来。所以我觉得非常称心如意。

可是，有一天，那是我在加州工学院好长时间了，我们遭到了很严重的烟雾袭击。那烟雾，比现在的可厉害得多——至少你的眼睛要疼得多。我站在一个角落里，泪眼汪汪的，我心里说，“这简直让人发疯！这绝对是神经病！最好是回康奈尔大学去。我要离开这个鬼地方。”

于是我就给康奈尔打电话，问他们，我有没有可能回去。他们说：“没问题！我们这就把事情安排好，你明天就过来。”

第二天，我在做这个决定的时候，幸运得不能再幸运了。老天爷必定是安排好了，好帮助我下定决心。我正往我办公室那儿走呢，一个家伙跑过来，对我说：“嗨，费曼！你听说出什么事儿了吗？巴德[54]发现有两种不同的恒星！我们原来测量的我们到各星系的距离，都是以一种类型的造父变星为根据的，可现在有另一种类型，因此，宇宙的年龄会是我们原来设想的2倍、3倍，甚至4倍！”

我知道这个问题。在那年头儿，地球似乎比宇宙还古老。地球有45亿年，宇宙却只有20亿或30亿年。这是一个大难题。这个发现，使一切问题迎刃而解：现在，事实证明宇宙比以前设想的要老。我马上就得到了这一信息——这家伙跑来，把这件事儿都告诉了我。

还没等我穿过校园到我办公室去，另一个家伙过来了——马特·梅瑟尔森（Matt Meselson），一个副修物理学的生物学家。（我曾经是他的博士论文的答辩委员。）他建立了第一台我们称之为“密度梯度离心分离机”的东西——它能测量分子密度。他说：“看我正在做的这个实验的结果！”

他已经证明，当一个细菌制造一个新细菌的时候，有一个分子，原封不动地由一个细菌传给了另一个细菌——我们现在知道，这分子就是DNA。你知道，我们总是认为一切东西都分裂、分裂。因此，我们以为细菌里的一切都一分为二，把其中的一半给了那个新细菌，但那是不可能的：不知在什么地方，那个包含着遗传信息的最小分子，不能够一分为二，而必须复制出一份它自身的拷贝，然后把这份拷贝送给那个新细菌，把另一份留给那个老细菌。梅瑟尔森是这么证明这一点的：他先让细菌在重氮中生长，然后让它们在普通的氮气中生长。他进行实验的时候，用密度梯度离心分离机来测量分子的重量。

第一代新细菌的全部染色体分子的重量，刚好在重氮中细菌染色体分子的重量和在普通氮气中的细菌的染色体分子的重量之间——如果一切都分裂，连染色体分子也分裂，结果就会是这样。

但在随后的几代细菌当中，当我们期望染色体分子重量将是重氮和普通氮情况下的分子重量之差的1/4、1/8和1/16的时候，分子重量却只有两组。一组和第一代一样重（在较重和较轻的分子正中间），而另一

组轻些——其重量就是在普通氮气中弄的分子的重量。较重的分子个数的百分比，每过一代，就减少一半，但其重量不变。这可太令人兴奋了——这是一项基础性发现。在我终于到了我办公室的时候，我意识到，我必须得待在这地方了。在这里，不同科学领域中的人，都告诉我事儿，这太令人兴奋了。这才是我真正想要的东西，真正想要的。

因此，过了一会儿，康奈尔大学打电话来，说他们把一切都安排妥了，这就快准备好了，我说："我很抱歉，我主意又变了。"但是，我当时决定永远不再决定变了。没什么事情——绝对没什么事情——能够再次改变我的想法。

你在年轻的时候，你有的是这种闹心的事儿——你该到那儿去吗，你怎么办。你真上火啊，想拿定主意，可接着又来了别的事儿。怎么简单，就怎么决定，倒来得容易些。别担心——没什么能够改变你的主意。我在麻省理工学院，就曾经这么做了一次决定。我在食堂吃饭的时候，懒得为吃什么甜点费心思了，因此我就决定总要巧克力冰淇淋，永远不再为这事儿操心——我就是这么解决那个问题的。无论如何，我决定永远留在加州工学院了。

有一次，有人想让我对加州工学院变卦。费米（Fermi）刚刚去世不久，芝加哥大学在找人接任他的位置。芝加哥大学过来两个人，要到我家来看看我——我不知道他们是为什么事儿。他们开始给我讲，我应该到芝加哥大学的所有的好理由：我能干这个，我能干那个，他们那里大人物很多，我有机会做各种各样有意思的事儿。我没问他们会给我多少钱。他们不停地暗示，如果我问的话，他们就告诉我。最后，他们问我，想不想知道薪水多少。"哦，不！"我说，"我已经决定待在加州工学院。我妻子玛丽·娄在隔壁，如果她听到薪水是多少，我们又该吵了。除此之外，我已经决定了不再决定了。我永远待在加州工学院。"因此，我不让他们告诉我他们给的薪水有多少。

大约1个月以后，我在开一个会，利昂娜·马歇尔（Leona Marshall）过来说："你不接受我们芝加哥大学的条件，可真够滑稽的。我们大失所望啊，我们搞不明白，你怎么能拒绝这么优厚的待遇。"

"容易，"我说，"因为我没让他们告诉我那是多少钱。"

一个星期之后，我收到了她的一封信。我打开信，第一句话是："他们提供的薪水是——"一大笔钱啊，是我当时薪水的三四倍。晕！她在信里继续说："在你还能继续读这封信之前，我就把薪水告诉你了。也许你现在愿意重新考虑一下，因为他们告诉我，那个位置还在为你预备着，我们非常希望你成为我们的一员。"

于是我给他们回了一封信："在信里看到这么一大笔钱，我觉得，我必须谢绝。我不得不谢绝这份薪金的原因，是我将有能力做我一直想做的事儿——找个迷人的情妇，为她买一座漂亮的房子，给她买好东

西……用你们给的这份薪水，我必定真的会这么做，我知道那会是什么结果。我会为她操心，挂念她在干什么，我们会吵架。我回家的时候，又会如何如何。这些闹心的事儿，会让我寝食不安，会让我心情不快。我搞物理也搞不好了，一切都将是一团糟！我一直想做的这种事情，对我是很坏的，因此，我已经决定，我不能接受你们的好意。”

第5部分　一个物理学家的世界

你解狄拉克方程吗？

我在巴西那年的岁末，收到了惠勒（John Wheel-er）教授的来信，说在日本将有一个理论物理学的国际会议，我喜欢不喜欢去？日本在战前有几位有名的物理学家——诺贝尔奖得主汤川秀树[55]和朝永振一郎[56]以及仁科芳雄等——但这次会议，是战后日本恢复生机的第一个迹象，我们都认为应该去帮助他们。

惠勒还随信寄来了一本军用短语手册，他写道，我们大家都学点儿日语，会很有意思。我在巴西找到了个日本妇女，教我发音，我还练习用筷子夹起纸片儿，读了很多关于日本的东西。那时候，对我来说，日本很神秘，到这么一个奇怪而奇妙的国家，该是很有趣儿的，所以我很用功。

等我们到了那儿，大家在机场见了面，我们被送到东京的一家旅馆。这旅馆是弗兰克·劳埃德·莱特[57]设计的。这是模仿欧洲旅馆，里头的小个子家伙，穿着一身制服，活脱就是菲利普·莫利斯（Phil-ip Morris）[58]。我们这不是在日本，这明明是在欧洲或者美国嘛！送我们到房间的那家伙，磨蹭着不走，把窗帘拉来拉去，等着你给他小费呢。什么东西都像是美国的。

我们的主人把一切都安排妥了。第一天晚上，我们在旅馆的楼顶上吃晚饭，为我们服务的女人，打扮是日本的，可菜单是英语的。为了学会几个日语短语，我遇到的麻烦可不少。到晚饭将近结束的时候，我对女服务员说，“Kohi-omottekitekudasai”她一鞠躬，退一边儿去了。

我的朋友马沙克（Marshak）在一旁连声地说：“什么，什么？”

“我说日语呢。”我说。

“哈，装模作样！你走哪儿都没正经，费曼。”

“这话怎么说的？”我说，语气很正经的。

“那好，”他说，“你刚才说什么来着？”

“我让她拿咖啡来。”

马沙克不相信。“我跟你打赌，”他说，“如果她把咖啡拿……”

女服务员出现了，端着咖啡，马沙克输了。

原来，只有我一个人学会了几句日本话——甚至惠勒，他还告诉大家都应该学日语呢，也一点儿没学会——我再也受不了了。我读了很多关于日本风格的旅馆的书，我们住的旅馆应该完全跟这个不一样嘛。

第二天早晨，我把那个把一切都安排妥当的日本家伙叫到我房间来，“我想住在日本风格的旅馆里。”

“这恐怕不可能啊，费曼教授。”

我在书上读过，日本人很礼貌，但也很固执：你得一直做他们的工作才成。因此，我拿定主意，跟他们一样固执，也跟他们同样礼貌。那是一场脑筋搏斗：这么来来回回的，折腾了30分钟。

“你为什么想去住日本风格的旅馆？”

“因为在这个旅馆里，我感觉不到我在日本。”

“日本风格的旅馆，一点儿都不好啊。你得睡在地板上。”

“我要的就是这个。我想看看是怎么个样子。”

“还没椅子啊——你呢，守着桌子坐地上。”

“没问题。那很好玩儿。那就是我要找的东西。”

最后，他才把难言之隐说了出来：“如果您住别的旅馆，汽车到会场的时候，得多停一站。”

“不用，不用！”我说，“早晨，我到这个旅馆来，在这儿上车。”

“那就妥了。好。”啰唆半天，都为这个——好像花费半个小时才触及真实问题，倒无关紧要似的。

他走到电话机那儿，要给别的旅馆打电话。走着走着，突然停下来了，又掉链子了。我又花了15分钟才发现，这次是为了信件收发的事儿。如果会上有什么消息，他们都已经安排好了该去哪儿传达。

“没问题啊，”我说，“我早晨来坐车的时候，我就在这个旅馆拿走给我的信啊、材料什么的。”

“那成。好。”他打电话去了，最后，我们终于往那个日本风格的旅馆走了。

我们一到那儿，我就觉得值啊：太可爱了！前头呢，有个地方，好脱鞋；然后呢，有个女孩儿，穿着民族衣服——宽腰带——穿着木屐，唏唏嗦嗦，碎步而出，拿了你的东西；你跟在她后头，穿过走廊，走廊上还铺着草席子呢，把纸糊的拉门儿拨开，她呢，喳喳喳喳，小碎步儿

走着。这整个太有意思了！

我们进了房间，把一切都安排妥当的那家伙，一路跟来，疲惫不堪，然后用自己的鼻子碰一下地板；她呢，赶紧跪下去，也用自己的鼻子碰一下地板。我觉得自己好尴尬。我也应该用我的鼻子碰一下地板吗？

他们这么互相打了招呼，他认可了给我的这个房间，出去了。这实在是个好玩儿的房间。到处都是照规矩弄的、符合标准的东西，这现在你都知道。可当时，在我看来，都无不新鲜。有个小壁龛，里头还有一幅画儿；一个花瓶，漂漂亮亮地斜插着几枝褪色柳；一方小桌儿，地板上放着，近旁铺好了软垫儿；屋子尽头儿，是两扇拉门儿，迈步出去，便是花园儿。

照顾我的这位太太，是位中年妇女。她帮我宽衣解带，给了我一件和服，就是一件简朴的蓝白便服，好在旅馆里穿。

我开了门，欣赏这个可爱的花园，然后坐在桌子边儿，做点儿小小的工作。

我在那儿待了15或20多分钟，一件东西吸引了我的目光。我抬眼一看，就在花园那边，在门口儿那儿，门边儿还有帘子，我瞥见一位非常漂亮的年轻日本妇人，一身华裳。

关于日本的风俗，我读过不少，我心里扑腾开了：谁派她来干吗？我暗想："这，或许会非常有趣儿啊！"

她稍知英语。"您，花园，喜欢看看？"她问。

我套上和我穿的和服相配的鞋子，我们就步入花园。她挽着我的胳膊，指给我看这看那。

到头儿来，事儿是这样：她知道那么点儿英语，旅馆经理就想，或许我喜欢她带我去浏览一下花园——不过如此而已。我当然有那么点儿失望，但这是文化相会呀，我也知道，想入非非，想的不是时候，是很容易的。

过了一阵子，照料我房间的那位妇人进来，说了点儿什么关于洗澡的话——用日语说的。我知道日本的洗澡，很有意思，迫不及待地要以身尝试，于是我说："嗨！"

我在书上看到过，说是日本的洗澡，非常复杂。他们用好多的水，而水是在外头烧的，而且，你不可把肥皂弄进洗澡水里，那会把水弄脏，下个人还得用这水呢。

我站起来，迈进浴室，那儿有洗手盆儿，我听得见隔壁那家伙，也

正关着门儿在家洗澡呢。突然之间，门儿拉开了：正在洗澡的那主儿，想看看这个不速之客是谁。“教授！”他用英语对我说。“别人在洗澡，您却闯进了洗澡间，这错得都离谱儿了！”那人是汤川教授！

他告诉我说，那妇人问过我，我想洗澡吗，此事无可怀疑；果真如此，她会为我善加准备，等洗澡间无人之时，她会禀告我的。世界上犯过如此严重的社交错误的，大有人在。幸运的是，我犯在汤川教授手里！

那个日本风格的旅馆，真是好玩儿；有人来访，尤其好玩儿。别的家伙来到我屋，席地而坐，谈天论地。我们还坐不到5分钟，照料我屋子的那位妇人，就端着糖盘儿、茶盘儿地进来了。好像你就是主人，这儿就是你自己的家，旅馆的工作人员呢，是帮助你招待宾客的。在美国，有客人造访你的旅馆房间，没人理你。你必须得打电话叫人过来服务，如此等等。

在这个旅馆吃饭，也别有情调儿。那个把托盘儿送来的女孩儿，在你吃饭的时候，会待在这儿陪着你，所以你不觉得孤独。我没法儿和她好好聊聊，但不妨事儿的。饭也美妙。比方说，汤上来了，是盛在盖着盖儿的碗儿里的。你掀开盖儿，里头是一幅漂亮的画儿：小块儿的葱叶儿，就那样在汤上漂着，美哉。食物放在盘子里，样子如何，很讲究的咯。

我拿定主意，我得尽可能像日本人那样生活。我说这话的意思，是吃鱼。我从小到大，就不喜欢吃鱼。但是，在日本，我发现，不吃鱼，可有点儿孩子气了：我吃了很多鱼，而且吃得有滋有味。（等我回到了美国，我做的头一件事儿，是直奔鱼那儿。可怕——跟从前一样可怕。我受不了鱼。后来，我发现了答案：鱼必须得非常非常新鲜——要是不这么新鲜，它就有股子味儿，我烦这味儿。）

有一次，我在这家日本风格的旅馆里吃饭的时候，他们给我上了一个圆形的、硬硬的玩意儿，跟鸡蛋黄儿大小相似，放在一杯黄色液体当中。到目前为止，日本的什么东西，我都吃过。但这玩意儿，吓住我了：这东西够费解的，样子像个脑子。等我问那个女孩儿，那什么玩意儿，她答道“kuri”。问也白搭。我琢磨着，它多半是个章鱼蛋什么的。我哆里哆嗦，吃这东西，因为我希望尽可能深入日本生活嘛。（我还记得“kuri”这词儿，好像我的命就系在这东西上——30年之后，我都没忘这事儿。）

第二天，我问开会的一个日本家伙，那叫人费解的东西，是什么玩意儿。我告诉他，那东西难吃死了。“kuri”究竟是个什么玩意儿啊？

“那词儿的意思是‘栗子’。”他回答。

我学的那些日本话，有几句是很有用的。有一次，汽车等了好长时间也不开，几个家伙说，“嗨，费曼！你懂日语，让他们赶紧点儿！”

我说，“Hayaku！Hayaku！Ikimasho！Ikima-sho！”——这意思是说，“走吧！走吧！快点儿！快点儿！”

我发现自己的日语失控了。我是从一本军事短语手册上学的这些短语的，那些说法想必是非常粗鲁的，因为旅馆里的人都开始急得像热锅上的蚂蚁，“是的，先生！是的，先生！”车也立刻就开了。

日本的这次会，分两个部分：一部分在东京，另一部分在京都。在到京都的车上，我把日本风格的旅馆的一些事儿，告诉了我朋友亚伯拉罕·派斯（Abraham Pais），他也想试试。我们住在“都城旅馆”里，里头美国风格和日本风格的房间都有，派斯和我共用一个日本风格的房间。

第二天早晨，料理我们房间的那个年轻女人，为我们准备了洗澡水，澡盆就在房间里。过了一阵子，她端着托盘回来送早饭。我衣服穿了一半。很客气地，她转朝我说，“Ohayo, gozaimasu！”这意思是“早晨好”。

派斯刚刚洗完澡，浑身滴答水儿，一丝不挂。她转向朝着他，同样安然自若，“Ohayo, gozaimasu！”然后，把我们的餐盘儿放下。

派斯看着我说，“老天爷，我们文明吗？”我们意识到这么回事儿：在美国，如果一个女仆来送早饭，这个家伙站在那儿，赤身露体的，那就会有一声尖叫、一通做作。可在日本，大家都见怪不怪，习以为常。对于这些事儿，我们觉得，他们比我们更进步，更文明。

我那时正在捣鼓关于液氦的理论，我已经琢磨出了怎么用量子力学定律，来解释超流动性这种奇怪的现象。对这一成就，我很觉得自豪，想在京都会议上讲讲我的研究。

第二天晚上，在我讲话之前，有个晚宴，坐在我旁边的，不是别人，正是昂萨格[59]教授，液态物理学和液氦问题的一流专家。他是那种沉默寡言的人，可金口一开，便掷地有声。

“呃，费曼，”他说，嗓子粗哑，“我听说，你已经明白了液氦的事儿。”

“那个，是……”

“哼。”整个晚宴，那就是他对我说的全部的话！不太怎么提情绪啊。

第二天，我发表了讲话，把液氦的一切都解释清楚了，到末了，我抱怨说，我还有点儿东西没有琢磨透：就是说，液氦从一态到另一态的转化，是属于第一序列（如在固体融化或者液体沸腾的时候——温度是恒定不变的），还是属于第二序列（如有时候你在磁力现象中看到的那样，温度是不断变化的）。

昂萨格教授站起来，语气严厉：“哈，费曼教授，在我们这个领域中，初出茅庐啊，我想，他需要接受点儿指教。有件事儿，他是应该知道的，而我们应该告诉他才是。”

我想：“我的个老天爷！我招谁惹谁了？”

昂萨格说：“我们应该告诉费曼，根据基本原理，没什么人已经正确地琢磨出任何液氦状态转化属于什么序列……因此，他的理论不允许他正确地搞出这个序列，这一事实，并不意味着他不曾令人满意地理解了液氦的许多其他方面。”到头来，他这是恭维我呢！但从他开讲的那个派头看，我还真以为他要修理我一顿呢！

不到一天的工夫，我在房间里，电话响了。是《时代》周刊打来的。打电话的那家伙说：“我们对您的工作很感兴趣。您能否寄给我们一份拷贝？”

我从来也没上《时代》，我非常兴奋。我很为我的工作自豪，我的讲话在会上的反响也很好，于是我说：“当然！”

“好的。请把它寄到我们在东京的办事处。”这家伙把地址给了我。我感觉棒极了。

我重复了一遍地址，那家伙说：“没错儿。谢谢您，派斯先生。”

“哦，不！”我说，大吃一惊。“我不是派斯。你找的是派斯啊？抱歉。等他回来，我会告诉他，你有话跟他说。”

几个小时之后，派斯回来了。“嗨，派斯！派斯！”我说，声音激动。“《时代》杂志打电话来！他们希望你把你在会上的论文，寄给他们一份。”

“哎呀！”他说，“名声，是个婊子啊！”

我倍感震惊。

打那儿以后，我发现派斯说得对，但人在当时，我想，要是我的名字上了《时代》，那可真的美啊。

那是我第一次到日本。我归心似箭，说哪个大学要我，我都去。日本人安排了一系列地方，够好几天参观的。

等到这一次，我已经和玛丽·娄结了婚，不管我们到哪儿，他们都热情招待。有个地方，他们专门为我们安排了一整套仪式，还伴以舞蹈，这通常是为大旅游团体表演的。在另一个地方，我们在船上遇到了许多学生。还有一个地方，市长见了我们。

在一个特别的地方，我们待在树林里的一小小的、不起眼的地方，

天皇来的时候，就待这儿。那是个很可爱的地方，周围都是森林，就是漂亮；选在溪流淙淙的这个地方，也是费了心思的。这地方有某种静谧之感，一种宁静的优雅气氛。天皇到这么个地方来小住，我以为，说明他比我们一般的西方人，对自然有着更细腻的感觉。

在每一个地方，研究物理的人，都告诉我他们在做什么，我就和他们讨论。他们告诉我他们正在研究的一般问题，然后写出一大堆方程式。

“稍等片刻，”我说，“这个一般的问题，有没有一个特别的例子？”

“怎么没有，当然有啊。”

“那好。给我一个例子。”我得看例子：除非我脑子里有一个具体的例子，看着它怎么走，我是理解不了任何一般的东西的。有些人，一开始还以为我迟钝呢，以为我不明白那个问题，因为我问了许多这种“傻瓜”问题：“阴极是正的还是负的？阴离子是这样的还是那样的？”

可是稍后，当这个家伙掉进方程式堆儿里的时候，他会说什么事儿，我就说，“稍等片刻！那儿，有个错误！那不可能对！”

这家伙看了看他的方程式，过了一阵子，他果然发现了那个错误，百思不得其解，“这家伙，一开始听不明白，可他怎么就能在这些乱七八糟的方程式中间看出个错误呢？”

他以为我是在推演数学步骤，但我干的不是这个。对于他正在努力分析的那个问题，我有一个具体可感的例子。我本能就知道，我亲身体验着那个东西的属性。因此，当方程式说它会这么行为的时候，我知道那错了，我跳起来说：“等等！那儿有个错误！”

因此，在日本，除非他们能给我一个可感的例子，他们大多数人找不到一个例子，我就不能理解任何人的工作，不能跟他们讨论。有些人倒是能给我一个例子，但那个例子经常稀松，你用一个简单得多的方法，就能解决这个例子所表达的问题。

由于我总是不问数学方程式的问题，而是问他们试图解决的那个问题的物理环境，一份在科学家中间流通的油印小报的标题，“费曼的轰炸，与我们的反击”，对我的日本之行做了归纳。（小报不起眼，可那是他们在战后搞出来的一种有效的交流系统。）

在走访了好几座大学之后，我在京都的“汤川研究所”过了几个月。我很喜欢在那儿工作。一切都那么好。你来工作的时候，得把鞋脱掉，早上会有人过来给你上茶，那时你正想喝杯茶。这很是惬意。

在京都，我发了狠心想学日语。我用功得多了，学到可以打出租车转悠和做事儿的地步。一个日本人每天给我上一小时的课。

有一天，他教我“看”这个词儿。

“好了，”他说，“你想说，‘我可以看看您的花园吗？’怎么说？”

我造了一个句子，用了我刚学到的一个词儿。

“不成，不成！”他说，“如果你想对某人说，‘您想看看我的花园吗？’你就用第一个‘看’。但是，如果你想看别人的花园，你得用另一个‘看’，这一个更礼貌些。”

在第一个情况中，你实际上说的是这么个意思：“你愿意瞥一眼我这个邋遢的花园吗？”可是，当你想看另一个伙计的花园的时候，你一定得这么说法：“我可否观赏您漂亮的花园？”这就是说，你必须得用两个不同的词儿。

然后，他给了我另一个情况：“你到一个庙里去，你想看看那个花园……”

我造了一个句子，这次用的是那个礼貌的“看”。

“不成，不成！”他说，“庙里的花园优雅得多，因此你一定得说出相当于这么一种意思的一句话：‘我可否瞻仰你们至为美妙的花园？’”

一个意思，要用三个或四个词儿来说，因为我做那事儿，那事儿就寒碜；你做那事儿，那事儿就高雅。

我学日语，主要是为了技术上的事儿，因此我决定试试在科学家们中间，有没有同样的问题。

第二天，在研究所里，我对办公室里的家伙们说：“‘我解狄拉克方程’这句话，用日语怎么说？”

他们说这样这样说。

“那好。现在我想说，‘你解狄拉克方程吗？’——你怎么说这个？”

“哈，你一定得用一个不同的词儿来说‘解’。”他们说。

“为什么？”我抗议。“我解这方程，你解这方程，做的不是同一件倒霉的事儿吗？”

“哈，是啊，可得用不同的词儿——那才更礼貌啊。”

我打了退堂鼓。我断定，我讲不来这种语言，不学日语了。

百分之七的答案

问题是要发现贝塔衰变的正确规律。看起来好像有两种粒子，名叫陶（τ）和西塔（θ）。这两种粒子，质量似乎完全相同，但是，其中的一种蜕变为两个介子，另一种却蜕变为三个介子。它们不仅是质量看来相同，寿命也相同，这真是一种怪异的巧合。因此，当时人人都关心这事儿。

在我参加的一个会议上，有人报告说，在回旋加速器当中，这两种粒子在以不同的角度和不同的能量产生出来的时候，其数目也总是相同——有多少个陶，就有多少个西塔。

当然，有这么一种可能性：那是同一种粒子，有的时候衰变为两个介子，有的时候衰变为三个介子。但是，没人承认竟然有这种事儿，因为有一个定律，叫宇称律。这个定律基于这么一个假定之上：所有的物理定律都是镜像对称的，这就是说，一个东西，要是能变成两个介子，那它就不可能变成三个介子。

在那样一个特别的时候，我真的不怎么能跟得上事情发展的脚步：我总有那么点儿落后。人人都透着聪明劲儿，我呢，觉得自己跟不上趟儿了。无论如何，我跟一个名叫马丁·布洛克（Martin Block）的家伙，一个实验物理学家，住一个房间。有天晚上，他对我说："你们这帮家伙，干嘛那么拘泥于宇称律？或许陶和西塔是同一种粒子。要是宇称律错了，那会有什么结果？"

我沉思了片刻，说："那将意味着，对左旋和右旋来说，自然规律是不同的，意味着有办法以物理现象为右旋下定义。我认为这事儿不那么可怕，尽管这必定会带来一些糟糕的结果，可我不知道。你干嘛不在明天问问那些专家？"

他说："不问，他们不会听我的。你来问吧。"

所以，在第二天，在会上，在我们讨论这个陶西塔难题的时候，奥本海默说，"关于这个问题嘛，我们需要听到某种更野一点儿的新想法。"

那我就站起来说，"我代替马丁·布洛克问这么个问题：要是宇称律错了，那会有什么后果？"

默里·盖尔曼经常拿这个揶揄我，说我没胆子为自己问这个问题。但不是这么回事儿。我认为，那非常可能是一个重要的观念。

李政道[60]代表自己和杨振宁[61]，对这个问题的回答有点儿复杂，像以往一样，我听不大明白。会议结束的时候，布洛克问我，李政道说的什么，我说我不知道，但依我之见，这问题还没了结……仍然有一种可能性。我不是认为这事儿非常可能，可我认为它可能。

诺姆·拉姆齐（Norm Ramsey）问我，我是否认为他应该做一个实

验，来寻找违背宇称律的现象，我回答，“解释此事，莫非实验。你发现不了什么东西，我输你50；你发现了，你输我1块。”

他说，“那我得大便宜了。”可他从来没做这个实验。

无论如何，违背宇称律的现象，被吴健雄62发现了，用的是实验方法，她为贝塔衰变理论开创了大量全新的可能性。此事也立刻引发了大量的实验。有些实验表明，电子从核里出来，是飞向左边的，有的证明是飞向右边的；关于宇称律，还有各种各样的实验，各种各样有趣的发现。但是，得来的资料令人困惑，没人能把事情综合起来。

罗彻斯特（Rochester）63有个会——一年一度的罗彻斯特会议。我还是落后，人家李政道都在发表关于宇称不守恒的论文了。他和杨振宁得到了一个结论：宇称律是可以打破的，现在，他在为这种现象制造理论。

在会议期间，我待在锡拉丘兹（Syracuse）64我妹妹那儿。我把那篇论文带回家，对她说：“我看不懂李政道和杨振宁说的这些东西。这也太复杂了。”

“不复杂，”她说，“你的意思，不是说你看不懂，而是说那东西不是你发明的。根据你听到的这个线索，按照你自己的思路，你却琢磨不出个头绪来。你应该设想你现在又是学生了，把论文拿到楼上，一行一行地看，检查一下那些方程式。你会很容易就看懂。”

我听了她的建议，从头到尾检查了一遍，发现它既明显，又简单。我一直害怕读这个东西，还以为它很难呢。

这让我想起好早以前做过的一件事儿，是和左右不对称方程有关系的。现在看李政道的公式，事情变得清楚了，他的解法简单得多：一切东西都是左旋耦合的。对电子和μ介子来说，我的预言和李政道的相同，只是我的符号不同罢了。当时我没有意识到，李政道处理的仅仅是μ介子耦合的最简单的例子，并没有证明全部的μ介子都是右旋的；但按照我的理论，全部的μ介子必定都是自动右旋的。因此，实际上，我事先就预言到了他说的事情。我的符号是不同的，但我在当时没有看到我把全部的事情都搞对了。

我预言了几件事儿，可还没有人为此做实验。但是，说到中子和质子，我却没把事情搞得和当时已经知道的中子、质子的耦合协调起来：这事儿有点儿棘手。

第二天，我回去开会，一个叫肯·凯斯（Ken Case）的好心人，把他分得的宣读论文的时间，匀了五分钟给我提出我的观点。我说，我确信，一切都是左旋耦合的，而且中子和μ介子的符号用反了，但我正在极力解决中子的问题。后来，几个实验物理学家问了一些和我的预言有关的问题，然后我就在夏天到巴西去了。

等我回到了美国，我想知道贝塔衰变的研究情况怎么样了。我去了吴健雄教授在哥伦比亚大学的实验室，她不在；但另一位女士在那儿，把各种各样的数据都拿给我看，乱七八糟的数字全都不对劲儿。在贝塔衰变中的电子，依我的模型来看，应该都是左旋耦合的；可在有些情况下，却右旋了。一切都支离破碎了。

等我到加州工学院的时候，我问一些实验物理学家，贝塔衰变情况如何。我记得三个家伙，汉斯·詹森（Hans Jensen）、阿尔德特·瓦帕斯特拉（Aaldert Wapstra）和费利克斯·勃姆（Felix Boehm）。他们坐在一个小凳子上，开始告诉下面这些事实：这个国家别的地方的实验结果，他们自己的实验结果。因为我认识这几个家伙，知道他们是多么仔细，我对他们的结果比对别人的结果，注意得更多。单看他们的结果，还不是那么不协调；但加上别人的结果，就都乱了。

最后他们把这些东西都一股脑地倒给了我，说："情况如此混乱，连大家建立多年的一些东西都成了问题——比方说，中子的贝塔衰变是S和T。这个乱劲儿啊！默里·盖尔曼说那可能是V和A。"

我从凳子上跳起来了说："这我就全明白了！"

他们还以为我在开玩笑呢。但是，我在开罗彻斯特会的时候的麻烦，是中子和质子的衰变：事事妥帖，但有一件事儿掣肘。如果事情是V和A，而不是S和T，那么那个掣肘的事儿也妥帖了。因此，我有了一个完整的理论！

那天晚上，我用这个理论，各种各样的事情都计算出来了。我计算的第一个事情，是μ介子和中子的衰变率。两个衰变率应该是互相联系着的，如果我的这个理论是正确的，根据某种关系，那么这个理论只差9%就对了。这很接近了，9%啊。这个理论本该更完美的，但也非常接近完美了。

我继续检查了另外一些事情，符合，连带着新的和更新的东西都符合了，我喜出望外。这是第一次，也是唯一的一次，在我的职业生涯中，我知道了一个自然规律，别人却不知道。（当然，这说法不真实。我后来发现，起码默里·盖尔曼——还有苏达山（Sudarshan）和马沙克（Marshak）——都搞出了相同的理论，但我没觉得他们败兴。）

以前我做过的另一些事儿，是把人家的理论拿过来，改善其计算方法，或拿来一个方程式，如薛定谔[65]方程式，来解释一个现象，如氦的现象。我们都知道这个方程式，我们也知道这个现象，但怎么拿方程式来解释现象呢？

我想到了狄拉克[66]，他拥有他的方程式有一阵子了——那是个新方程式，告诉我们电子怎么行为——现在我也有一个关于贝塔衰变的方程式，没有狄拉克的方程式那么重大，但也不错啊。我发现了一条新的规律，这是头一遭啊。

我给在纽约的妹妹打电话，感谢她在罗彻斯特会议期间，让我坐下来研究李政道和杨振宁的论文。曾经觉得不自在，觉得落后，可现在我登堂入室了。我得到了一项发现，仅仅是听了她的建议而得到的一项发现。我又能投身于物理当中了。可以这么说吧，我想为此谢谢她。我告诉她，事事都妥帖了，只差9%。

我太兴奋了，算个不停，妥帖的事儿层出不穷：它们是自动妥帖的，丝毫也不勉强。人在当时，我开始忘记了那9%，因为其他的一切都顺顺利利。

我在夜里干得很卖力，坐在厨房靠窗的小桌子边儿。工作得越来越晚——下半夜两三点的样子。我努力工作着，把那些计算结果和那些妥帖的事情弄得天衣无缝，我沉思，气定神凝，外面漆黑而宁静……突然，啪啪啪啪——好响，有人敲窗。我一抬眼，一张白脸，就在窗上，近在咫尺，连惊带吓，我尖叫起来！

那是我认识的一个女士，跟我生气呢，因为我假期回来，没立刻给她打电话告诉她我回来了。我让她进来，想跟她解释，眼前我正忙着呢，我刚刚发现了个事儿，这事儿很重要的。我说，“请出去，让我弄完。”

“不，我不想烦你。我就坐在客厅里。”

我说，“呃，那好，但坐那儿也没劲啊。”

严格来说，她并没坐在客厅里。最好的说法，是她似乎是蹲在一个角落里，把两只手攥到一起，不想来“烦”我。当然，她的目的，是非要把我烦死不可！她达到了目的——我不能不理她。我火儿来了，我受不了这个。我不得不做这个计算，我在进行一项伟大的发现，我欣喜若狂，不知怎么的，对我来说，这个发现比这个女的更重要——起码在那个时刻，就是这样。我记不得我最后是怎么把她弄走的，反正挺难。

又干了一阵子，时辰更晚，我也饿了。我走到大街上，往五个或十个街区之外的那个小饭店那儿走。我以前也经常这样，深夜出行。

以前有几次，经常有个警察挡住我，因为我一边走，一边思考，然后，停住不走了——有的时候，冒出了个想法，要想继续走路，太难了。你必须得把什么事儿搞确实了啊。于是，我就不走了，有的时候，我还把双手举在空中，自言自语：“这些东西之间的距离，是那个样子，那么这个就会是这个样子……”

我两手乱比画，站在大街上，警察过来了：“你什么名字？你住哪儿？你在干什么啊？”

“啊！我在思考嘛。抱歉，我就住这儿，经常到那个饭店去……”过了些时候，他们都知道那是谁，再也不挡我的路了。

我到了饭店，吃着饭还兴奋呢，我告诉一个女士，说我刚刚弄出个发现。她开口了：她是一个消防队员或者护林员什么的老婆。她很寂寞——都是我不感兴趣的事儿。所以呢，那种事儿，有啊。

第二天早晨，我去上班，去找瓦帕斯特拉、勃姆和詹森，“我已经把一切都搞出来了。事事都妥帖了。”

克里斯蒂（Christy）也在那儿，说，“你用的是什么衰变常数？”

“就是那谁谁的书上的那个。”

“可那个已经被发现是错误的，最近的测量表明它有7%的误差。”

我这才记起了那个9%。这对我来说，像个预言：我跑回家，搞出了这么个理论，说中子衰变将有9%的误差，第二天早晨他们告诉我，实际上，那个数有7%的变化。但是，是从9%变为16%（这可不好），还是从9%变为2%（这个很好）？

正在那时，我妹妹从纽约打来电话：“那9%怎么样了？——是怎么回事儿啊？”

“我刚发现，有一个新的数据：7%……”

“往哪边儿变啊？”

“我正在把这事儿捣鼓出来呢。回头儿给你打电话。”

我太兴奋了，兴奋得没法儿思考。这好像你赶飞机，你不知道你是不是晚了，你就是搞不清楚了，这时，有人告诉你：“现在是夏时制嘛！”没错儿，可提前还是延后？往哪边儿？人一激动，这事儿，想不清楚的。

于是，克里斯蒂进了一个房间，我进了另一个房间，各人都静悄悄的，这样我们才能把问题想透彻：这个是这么动的，那个是那么动的——这不算很难，真的，就是激动。

克里斯蒂出来了，我也出来了，我们都同意：是2%，稳稳当当地在实验许可误差之内。那个常数毕竟已经改变了7%，那2%倒真可能是误差。我给我妹妹打电话：“2%。”这个理论是正确的。

（实际上，那不对：真的说来，那是1%，什么原因，当时我们还不知道，只是后来尼古拉·卡毕博（Nicola Cabibbo）才理解了这事儿。因此，那个2%，完全不是实验误差。）

默里·盖尔曼把我们的观念比较并综合了一番，写了一篇关于这个理论的论文。这个理论相当严整，它比较简单，它把许多事情都弄妥帖了。但我以前告诉过你，有好多乱七八糟的数据。在有些时候，我们竟

然能走得这么远，能说出哪些实验是错误的。

这方面的一个好例子，是瓦伦丁·特勒第（Val-entine Telegdi）做的一个实验。在这个实验中，他测量了当一个中子衰变的时候，向各个方向飞出的电子数。我们的理论预言，各个方向上的电子数应该是一样的，但特勒第发现一个方向上的电子数要比另一个方向上的多11%。特勒第是一个优秀的实验家，做事很仔细。有一次，他在什么地方讲话，提到了我们的理论，说："理论家的麻烦，是他们从来也不留心实验！"

特勒第还给我们寄了封信，话说得并不严厉，但无论如何还是在表明，他确信我们的理论是错误的。在信末，他写道："关于贝塔衰变的'费盖（费曼、盖尔曼）理论'，得'费劲掩盖'点儿什么。"

盖尔曼说："我们拿这事儿怎么办？你知道，特勒第善于做实验。"

我说："我们权且等待。"

两天之后，从特勒第那儿又来了一封信。他心服口服了。根据我们的理论，他发现：从中子弹出来的质子，在所有的方向上是不同的，这样一种可能性，他忽视了。他想当然地认为那是相同的。用我们的理论所预言的数据，来修正他一直在用着的数据，实验结果就没有掣肘的地方了，理论和实验完全一致。

我知道特勒第非常出色，跟他顶牛儿，不大容易。但在当时，我已经确信他的实验必定什么地方出了差错，而且他也会发现——他自己找漏子，要比我们去找，好得多。我说我们不应该去琢磨那件事儿，而是权且等待，原因就是如此。

我去了巴舍尔教授那儿，把我们的成功告诉了他，他说："是啊，你们挺身而出，说中子质子耦合是V而非T。大家在以往都以为那是T。说它是T的那个基本实验在哪儿？你为什么不看看以前的实验结果，找找那些实验出了什么毛病。"

我离开他，去找到了关于那个实验的原始文章，文章说中子质子耦合是T，有什么东西让我大吃一惊。我记得我以前曾经读过这篇文章（以前，《物理评论》上的文章，我篇篇必读——那时它还不厚）。我记得，当我再看到这篇文章的时候，看着那条曲线，心里想："那什么也证明不了啊！"

你看，它依靠的是整个数据范围靠边儿上的一两个点，有一个原则：在数据范围靠边儿上的一点——最后一个点——是不够好的，因为，如果它足够好的话，那就还有一个更靠外的点。我本来就意识到，中子质子耦合是T这整个观念，就是基于那最后一个点的，那个不很好的点，因此它证明不了什么。我记得我注意到了这个！

等我对贝塔衰变感兴趣的时候，我就直接阅读那些"贝塔衰变专

家”的报告，都说那是T。我从来没看过原始数据，我只读那些报告，跟个傻瓜似的。假定我是个好物理学家，那么以前在罗彻斯特会议上，我想到原来那个观念的时候，本来立刻就会检查“我们知道那是T，果真可靠吗？”——那才是明智之举。我本来会马上意识到我早就注意到那并没有令人信服地证明任何东西。

打那以后，对“专家们”的任何东西，我再也不费心思了。什么东西，都是我自己计算。当人们说夸克理论相当不错的时候，我让两个博士，费恩·拉芬达尔（Finn Ravndal）和马克·基斯令格（Mark Kislinger）与我一道，把这个理论从头到尾搞了一遍。只有这么个搞法，我才能检查出这个东西还确实能得出相当妥帖的结果，而且它是一个值得重视的好理论。我再也不会犯那个错误了，只读专家意见的那个错误。当然，你只有一次生命，你把什么错误都犯过了，这才知道不该做什么，而你这一辈子也完了。

十三次

有一次，在一个地方市立大学里教科学的一个老师，过来问我，愿不愿意到那儿讲个话。他给我50块钱，但我告诉他，我不在乎钱。“那是个市立大学，是吗？”

“是。”

我想到的是，当我跟政府打交道的时候，我通常不得不缠在一大堆例行公文当中，于是我笑道：“我很高兴去讲话。整个事情，只有一个条件”——我卖了个关子，继续说——“我签名，决不超过十三次，还得包括签支票那次！”

那家伙也笑了。“十三次！没问题。”

签字的事儿，这就开始了。首先，我必须签一个东西，说我忠于政府，否则我就不能在市立大学里讲话。我还必须签两次，是吧？然后呢，我必须签某种把什么权力出让给市政府的文件——我记不得是个什么玩意儿。很快，签字次数就一路攀升。

我必须得签一个东西，说我是个货真价实的教授——这是当然的，因为那是市政府的事儿啊，那就得保证经办者别偷偷让自己的老婆和朋友来上课，或者甚至根本不请人上课。有各种各样的事儿，都要保证，签字次数一直在上升。

这下好了，那个开始还笑的家伙，好紧张啊，但我们刚好把事情办完。一次不差，我签了十二次。还有一次，好签支票，于是我们就出发，去讲话。

几天之后，那家伙过来送支票，他真是满头大汗啊。他说，我确实

讲过这个话，但除非我签一个表格，他就能给我钱。

我说：“如果签这个表，我就签不成支票。但是你在场，你听到了那个讲话，为什么你不签？”

“我说，”他说，“你搞的这一套，是不是有点儿傻啊？”

“不傻。在开头，我们就弄了这么个协议。我们真没想到会需要十三次签字，但是我们彼此都同意了，我认为我们应该坚持到底。”

他说：“我是尽力了，到处打电话。什么我都试过，他们说，那是不可能的。除非你签这个表格，否则你就是拿不到钱。”

“不拿就不拿，”我说，“我已经签了十二次，我也讲了话。那钱，我不要了。”

“但我太过意不去了。”

“没事儿。我们说定了。别担心。”

第二天，他打来电话。“这钱，他们不能不给你！他们已经把这钱拨出来了，已经从账里出来了，因此他们必须得把这钱给你啊。”

“那好，如果他们必须得给我这笔钱，让他们给我好了。”

“但你必须签这个表。”

“我不签这个表！”

他们都给卡住了。这人该得这钱，可他不想为它签字，这钱没地方搁了。

最后，事情弄妥了。费了好长时间，事情很复杂——但我用第十三次签名，兑了我的支票。

“鸡母牛，鸡母牛！”

我不知道是怎么回事儿，反正我去旅行的时候，总是粗心大意。地址啊，电话号码啊，邀请我的那些人的情况啊，我都不留心。我琢磨着，会有人来接我，或者别的一个人知道我们要到哪儿去，但不知怎么，我能把事情弄妥。

有一次，那是在1957年，我去参加在北卡罗来纳大学举行的一个引力会议。有人把我看成不同领域中的一个也关心引力问题的专家。

那天，我在机场降落的时候，已经赶不上会议了（第一天我没参

加），我出了机场打出租车，对车辆调度员说，“我想到北卡罗来纳大学。”

“你要到哪个北卡罗来纳大学，”他说，“是在罗利（Raleigh）67的北卡罗来纳州立大学，还是在教堂山（Chapel Hill）68的北卡罗来纳大学？”

不需要说，我一点也不清楚了。“他们在哪儿呢？”我问，以为这两个大学一定相距不远。

“一个在北边儿，另一个在南边儿，距离大约一样。”

我身上没带什么东西能告诉我会场在哪儿，天色都那么晚了，也没别的人往会场那边儿去了。

我灵机一动。“听我说，”我对车辆调度员说，“会议是昨天开始的，因此有一大群家伙都往会场那边儿去，他们昨天一定是从这儿走的。让我告诉你，他们是个什么德行。他们都是一副懵懵懂懂的样子，互相谈着什么，不大在意到哪儿去，互相说的话，好像是这么个声音：‘鸡母牛，鸡母牛（G-mu-nu）69’。”

他眼睛一亮。“啊，是的，”他说，“这么说，你是要到教堂山了！”他对下一辆正在排队的出租车说，“把这位先生送到教堂山的大学。”

“谢谢。”我说，然后我就奔会场了。

但那是艺术吗？

有一次，我在一个聚会上打桑巴鼓，打得很热闹。有个家伙，特受鼓声的感染。他进了洗澡间，把衬衫脱了，用剃须膏在胸膛上画了个可笑的图案，出来发疯地跳，耳朵上还挂着樱桃。很自然，这个发疯的傻瓜和我立刻成了好朋友。他的名字是杰瑞·左提安（Jerry Zorthian），他是个艺术家。

关于艺术和科学，我们进行了长时间的讨论。我说的是类似这么一种意思：“艺术家，找不着北：他们没什么主题！他们习惯于宗教主题，但他们丢失了自己的宗教，现在他们什么也没了。他们不懂这个他们身在其中的技术世界；对于那个真实世界的美，那个科学世界的美，他们一无所知。因此，他们心里没什么东西好画的。”

杰瑞会这么回答：艺术家不需要物理的主题。可以用艺术来表达的情感，多了去了。此外，艺术可以是抽象的。不仅如此，科学家把自然打碎了，把它变成了数学方程式，破坏了自然美。

有一次，我到他那儿给他过生日，那一次的这类愚蠢争论，一直延续到下半夜三点。第二天早晨，我打电话把他叫醒了：“听着，杰瑞，”我说，“我们这么吵，也吵不出个所以然，原因是，关于科学，你什么也不知道，我呢，关于艺术，也什么也不知道。因此，每个星期天，我们轮换着，我给你上科学课，你给我上艺术课。”

“那好，”他说，“我教你怎么画画儿。”

“那不可能。”我说，因为，我在上高中的时候，我只会画沙漠上的金字塔——主要是直线构成的嘛——我时不时地想试着画棕榈树，加上个太阳。我绝对无才。跟我坐一块儿的那家伙，跟我一样有才华。要是让他想画什么就画什么，他画的那东西，是两个脏乎乎、扁歪歪的椭圆形，像两个摞在一块儿的轮胎，轮胎里头伸出根儿杆子，杆子头儿变成了个绿色的三角形。我们得假定那是棵树。因此，我跟杰瑞打赌，他教不会我画画儿。

“当然了，你得用功啊。”他说。

我保证用功，但还是打赌他教不会我画画儿。我非常想学会画画儿，原因只有我自己知道：我想传达一种感情，我对这个世界的美的感情。那很难说得清楚，因为那是感情。那种感情，跟宗教感情差不多，这个宗教和一个控制着整个宇宙的神有关系。事物显得这么不同，行为也这么不同，可在“布景背后”，它们都受着同一种组织、同样的物理规律的支配，思想此事，你会感觉出有一种普遍性。这是对自然的数学之美的赏识，是对这种美的工作方式的欣赏，是对我们从原子之间的内在工作的复杂性当中看出来的那些现象的意识；是一种关于这种美有多么戏剧化、有多么奇妙的感觉。那是一种敬畏之感——科学的敬畏——我觉得可以通过绘画，把这感觉传达给别人，别人也有这种感情的。我的画儿可以提醒他，让他暂时记起宇宙的壮丽。

原来，杰瑞是个好老师。他首先告诉我说，回家，想画什么就画什么。于是我就想画一只鞋，然后画盆花。画得乱七八糟！

我们下次见面的时候，我给他看了我的习作：“哦，你看！”他说，“你看，这靠后的这个地方，花盘的这个线条，没碰着叶子。”（我本意是要它碰着叶子的。）“这很好哇。这是一种表现深度的办法啊。你很聪明。”

“你没把全部的线条都搞得一般粗（我不是故意那么做的啊），是很好的。全部线条都一般粗，那种画儿，发呆。”他又继续说了与此类似的一些话：我什么都想错了啊，他习惯于以积极的方式来教我点儿东西。因此，我坚持努力，我呢，渐渐有点儿起色，但我怎么也不满意。

为了练习得更多，我还报名参加了一个函授学校的班儿，“国际函授学校”的班儿，我不得不说这个学校好。他们让我开始画三棱锥和圆柱体，还加上阴影什么的。我们涉猎了许多领域：素描、蜡笔、水粉，还

有油画。学期快结束的时候，我却渐渐疲倦了：我给他们画了一幅油画，但总也没寄出去。他们不停地给我来信，敦促我不要半途而废。他们非常好。

我一直都在练习画画儿，对它越来越感兴趣。如果我在开会，会议开得不顺利的时候——像那次卡尔·罗杰斯（Carl Rogers）到加州工学院来，跟我们讨论，加州工学院该不该搞一个心理学系——我就画别人。我带着一些小开本的纸，走到哪儿都练习画画儿。因此，杰瑞教我的时候，我很用功的。

另一方面，杰瑞的物理学学得并不多。他心猿意马。我想教他电学和磁学的什么东西，但我一提起“电”，他就告诉我，他那个转不起来的电动机的什么事儿，他怎么或许能把它修好。我想让他看看电磁铁是怎么工作的，我就卷了个小线圈儿，把一根钉子系在一根线上，我给它通上电，钉子呢，摇摇晃晃地就进了线圈儿里，杰瑞说，“噢噢！就跟性交似的！”只好作罢了。

因此，现在我们又发生了新的争论——究竟他是个比我好的老师，还是我是个比他好的学生。

想让一个艺术家来赏识我对自然的那种感情，还想让他能描绘这种感情，这个念头儿，我打消了。现在我就得加倍努力，学习画画儿，那样我就能自己来办了。这是个野心勃勃的事业。这个想法，我谁也没告诉，因为我多半是永远也做不到。

在我开始学画画儿的时候，一个我认识的女士，看了我的习作，说：“你应该上帕萨迪纳艺术博物馆那儿。他们那儿有绘画班儿，有模特儿呢——裸体模特儿。”

“不去，”我说，“我画得不够好，我会很尴尬。”

“你很可以了啊！你应该看看别人画得什么样儿！”

于是，我鼓足了勇气到那儿去了。第一节课上，他们说，要准备好印报纸的那种纸——大幅的低档纸，跟报纸那么大的——还有各种各样的铅笔和炭笔。第二节课，一个模特儿进来了，她开始摆了十分钟的姿势。

我开始画这个模特儿，到我才画了一条腿的时候，十分钟用完了。我往四周看了看，人人都已经画好了一幅完整的画，背后还加了阴影呢——整个完工了。

我明白自己是半瓶子醋。可是，到最后，那个模特儿要摆三十分钟姿势。我画得很卖力气，费了吃奶的力，倒也能画完她整个的轮廓。这次，我有了一半儿的希望。因此，这次我也不把我的画盖住了，因为我已经画完了前一次该画的那些。

我们转来转去，看看别人画得如何，我发现了他们的真本事：他们画的那个模特儿，惟妙惟肖，明暗有度，连坐着的那个椅子上的那个小挎包也画上了，台子也画上了，什么都画到了！他们手执炭笔，嚓、嚓、嚓、嚓，一气呵成啊，我琢磨着，我是没指望了——彻底没指望了。

我回去把我的画盖上了，它只画了几根线，挤在报纸的左上角那儿——那之前，我只在书本大小的纸上画——但班上的人，都在近旁站着呢：“噢，看看这个，”他们当中有个人说，“笔笔不虚啊！”

我不确切知道这话是什么意思，但我得到的鼓励，足够让我下次课还来。与此同时，杰瑞不停地告诉我，画儿画得太满，没任何好处。他告诉我不必在意别人，因此他告诉我，他们也不怎么样。

我注意到，那个老师没对大家说得太多（他只告诉我，说我的画在那页上太小了）。他却努力鼓励我们实验新方法。我想起了我们是怎么教物理的：我们有那么多技巧——那么多数学方法——我们从来没停止告诉学生怎么做事情。另一方面，这位画画儿的老师，怵于告诉你任何事儿。如果你的线条笔力太重，这个老师不会说：“你的线太重了啊！”因为有些艺术家琢磨出了一种办法，能用很重的线条搞出了不起的画来。老师不想把你推到某种特别的方向上去。因此，怎么通过潜移默化的方式，而不是下达指令的方式来和学生交流，绘画老师就有这种麻烦了。物理老师的麻烦，是总教怎么解决物理问题的技巧，却不教精神。

他们总告诉我要“放松”，要无拘无束地画。我琢磨着，这并不比告诉一个掐着方向盘学开车的人“放松”，更起作用。那么说，是没有用的。只有在你知道怎么仔细地弄它的时候，你才开始放松。所以，我抵制这种没完没了的叫人放松的玩意儿。

他们发明的一个叫我们放松的练习，是画的时候，不看纸。你的眼睛一直盯着模特儿，在纸上画线条的时候，只看着她，不看你画的那些东西。

有个家伙说，“我就是忍不住要看。我没办法不自欺欺人。我敢打赌，大家都在自欺欺人！”

“我不自欺欺人！”我说。

“哇噢，装蒜！”他们说。

我把练习做完了，他们过来看我画的是什么东西。他们发现，确实，我没自欺欺人。一开始的时候，我的铅笔尖儿就断了，纸上除了压痕儿，空空如也。

等我把铅笔弄得好用了，我又来试。我发现，我的画有某种力度

——一种可笑的、毕加索式的力度——这我自己很得意。我觉得这画儿好，原因是，我知道那样画，是不可能画好的，因此呢，你不必画好——那才是这种放松练习的目的所在。我本以为“放松”的意思是“信笔涂鸦”，但实际上是放松，别担心到画出来的时候，画儿是个什么样子。

我在这个班里，进步不小，我感觉颇为不错。到最后一个学期，我们的模特儿都是身量庞大得走了形儿的那种，画这种模特儿，很好玩儿。可是，最后一堂课，我们的那个模特儿，却是个体态匀称、金发碧眼的妞儿，比例非常完美。到那个时候，我才发现，我仍然不知道怎么画画儿：我能画出来的东西，怎么看也不像这个漂亮的女孩儿！画别的模特儿，你画什么东西，如果画得大点儿或者小点儿，无所谓，因为反正是个走形儿的。但是，如果你画的这个东西装配得这么好，你就不能自欺欺人了：一定得画好才是！

有一次在下课的时候，我无意听到那个真会画画儿的家伙问这个模特儿，她能不能单独为他摆姿势。她说，可以。“那好。但是，我还没有画室呢。我必须得先把这个问题解决了。”

我琢磨着，我可能从这个家伙那儿学到不少东西。除非我想点儿办法，我就没机会再画这个体态匀称的模特儿了。“对不起，”我对他说，“我房子楼上有个房间，可以用作画室。”

他们俩都同意。我把这家伙的几幅画儿拿给杰瑞看，但他吓呆了。“这些东西，不是那么好啊。”他说。他努力解释为什么，但我实在是听不懂。

在开始学画儿之前，我从来没有太大的兴趣去看看艺术。对艺术的东西，我不怎么欣赏；要说欣赏，也不经常，比方说，那次我在日本的一个博物馆里的时候。我看到一幅在泛黄的纸上画的竹子。在我看来，这画儿的妙处，在于它不过是寥寥几笔，但它同时又是竹子，这二者之间有一种完美的平衡——我可以随心所欲地一会儿把它看作笔触，一会儿把它看作竹子。

绘画班之后的那个夏天，我在意大利参加一个科学会议，我想看看西斯廷教堂。早晨我早早就去了，比任何人都先买了票，然后一开门，我就跑上台阶。因此我享受了一段不寻常的时光，在别人来之前，在宁静的敬畏中，看着这整个教堂。

游客们很快就来了，一群一群的人到处乱转，说着不同的语言，指指点点的。我到处走，看了一阵子天顶。然后，我的视线稍微向下移动了一点儿，我看到了一些巨幅的、装了框子的画儿，我想，“嚯！我以前不知道这个！”

不幸的是，我把导游手册忘在旅馆里了，但我心里想，“我知道为什么这些画不出名了，这些画不怎么好啊。”但是，我接着看另外一幅，我说，“哇噢！那幅好啊。”我看了另外那些。“那个也好，那个也是一样，

但那个稀松。”我从来没听说过这些画，但我拿得准，这些画都好，只有两幅是例外。

我到了一个叫“拉菲尔”的地方——拉菲尔展室——我注意到了相同的现象。我心里想，“这拉菲尔，参差不齐啊。他画得不总是好。有的时候，他很好。有的时候，就是垃圾嘛。”

等我回到了旅馆，我那本导游手册，关于西斯廷那部分，说：“在米开朗基罗的那些画下面，有十四幅是波提且利（Botticelli）和佩鲁吉诺（Perugino）的”——这都是大艺术家——“还有两幅是什么什么人的，没什么重要性。”这对我来说，可是太兴奋了，我也认得出来一个美的艺术品和一个不美的艺术品之间的区别啊，虽然那究竟是怎么个区别，我也说不准。作为一个科学家，你总是认为你明白自己做的事儿。可是，艺术家，说“那个很伟大”，“那个不怎么样”，过后却说不出个所以然来，就像杰瑞对我带给他看的那些画所发表的评论那样，你就信不过他们了。但现在我也是这样：我也能这么干！

拉菲尔展厅，有个秘密，原来是这样：只有一部分绘画，才是大师手笔；其余的，是学生弄的。我喜欢拉菲尔的那些。这让我对自己的艺术欣赏力自信大增。

不管怎么说，艺术班的那个家伙和那个体态匀称的模特儿，来过我家好几次，我想画她，我想学他。做了许多习作之后，我终于画了一幅我觉得实在好的画儿——她的头像——第一次成功，我很兴奋。

我有了足够的自信，问我的一个叫史蒂夫·德米垂阿德（Steve Demitriades）的老朋友，可否请他漂亮的妻子为我摆姿势。作为回报，我将把肖像送给他。他笑了。“如果她愿意浪费时间为你摆姿势，我不介意，哈、哈、哈。”

我为她的这幅肖像工作得很卖力，等他看到了，他完全站到了我的立场上：“画得可真漂亮啊！”他叫起来。“你能不能把它用照相机照下来，多复制几份？我想寄一份给我在希腊的妈妈！”他妈妈从来也没见过儿媳妇。想到我已经进步到有人要我的画儿的地步，这事儿来劲啊。

相似的一件事儿，发生在加州工学院一个家伙搞的一次小型艺术展览会上，我贡献了两幅素描和一幅油画。他说，“我们应该在画儿上贴个价格标签。”

我想：“别犯傻了！我不打算卖啊。”

“那会使这个展览更有意思一点儿嘛。如果你不是舍不得的话，那就弄个标签上去。”

展览之后，那个家伙告诉我，一个女孩儿已经买了我的一幅素描，还说想跟我说说话，以便发现这画儿的更深的寓意。

那画儿名为“太阳磁场”。为了这幅特别的画儿，我借了一幅在科罗拉多的太阳实验室拍的漂亮的日冕照片。因为我明白太阳磁场是怎么把火焰拽起来的，而且在当时，我琢磨出了一种技法，来画磁力线（跟女孩儿飘动的长发相似），我想画画家们都没想到要画的某种漂亮的东西：磁场中的那种相当复杂和翘曲的线，在此处聚拢，却在彼处散开。

我把这些都解释给她听，还给她看了使我有了这么个主意的那幅照片。

她告诉了我这么个故事：她和她丈夫去看过展览，他们都非常喜欢这幅素描。“我们干嘛不买下来？”她建议。

她丈夫，是那种从来也不会当机立断的人。“让我考虑考虑再说吧。”他说。

她想起来，再过几个月，就是他的生日，于是她当天返回，自己买了。

那天晚上，他下班回家，心情抑郁不振。她终于弄明白了他是怎么回事儿：他觉得，把那幅画儿买来给她，那才好。但是，等他回到展览会，有人告诉他，那画儿已经卖出去了。因此，她就把这事儿秘而不宣，等他过生日的时候，好给他个惊喜。

我从这个故事中得到了启示，这启示对我还是很新鲜的：起码从某些方面说，我终于理解了艺术确实有什么用处。艺术给某个单个的人以快乐。你能制造出一个东西，有人喜爱之至。他们或者沮丧，或者愉快，都是因为你制造的这破玩意儿！在科学中，那是一种普遍而大的东西：你不知道直接欣赏它的那些单个的人。

这个使我明白了这么一件事儿：卖画儿，并非为钱，而是为了踏踏实实地知道，那画是在实在想要它的一个人的家里。那个人，要是得不到它，就茶饭不香。这事儿透着好玩儿。

因此，我决定卖画儿。然而，我却不希望大家来买我的画儿，是因为他们想当然地以为我这个物理学教授没画画儿的本事，这可够你咂摸味儿的，所以我就起了个假名字。我的朋友建议我叫“奥菲”（Au Fait），在法语里是“办妥”之意，我却把这个名字写成“阿飞”（Ofey），这刚好就是黑人送给“白鬼”（whitey）的那个称呼。但我毕竟是个白鬼，所以正合适。

我的一个模特儿，想让我给她画幅画儿，但她没那份儿钱。（模特儿没钱。如果她们有钱，还不干模特儿这行儿了。）如果我给她一幅画儿，她就愿意免费为我摆三次姿势。

“事儿得倒过来，”我说，“如果你白为我摆一次姿势，我会给你三幅画儿。”

她把我给她的画中的一幅，挂在她的小房间的墙上，很快，她的男朋友注意到了。他太喜欢这画儿了，他想出钱为她画一幅肖像。他要付我60块钱。（我现在长了行市了。）

她有个念头儿，想当我的经纪人：她到处兜售我的画儿，能赚点儿小小的外快，她会说，“在阿尔塔迪纳，新出了一位艺术家……”身处另一个世界中，这堪为乐事啊！她做了一番筹划，把我的一些画儿摆到了“小公牛”，这是阿尔塔迪纳最雅致的一家百货商店。她和艺术部的那位女士来挑了我几幅画儿——是几幅我早先画的植物（我不喜欢）——全都装了画框。然后呢，我得到了“小公牛”的一份签了字的文件，说他们接受委托，取走什么什么画儿。当然，没有卖掉任何一幅，但我是大大成功了：我的画在“小公牛”那儿卖啊！把画儿放在那儿，也是乐事儿啊。这样儿，有朝一日我就可以说，在艺术世界里，我曾经达到那样一种成功的巅峰。

我大多数的模特儿，是通过杰瑞搞到的，但我也想自己找一些模特儿。每当我遇到个年轻女人，看样子好像对画画儿感兴趣，我就让她为我摆姿势。最后的结果，总是我画她的脸，因为我不怎么知道如何处理裸体这个主题。

有一次我在杰瑞那儿，我对他妻子达布妮（Dab-ney）说：“我没办法让女孩儿们光着身子摆姿势，我不知道杰瑞是怎么弄的！”

“哈，你从来也没有要求她们那么做？”

“哦！我连想都没那么想。”

我遇到的下一个女孩儿，想要她为我摆姿势，是加州工学院的一个学生。我问她愿不愿意为我裸体摆姿势。“当然。”她说，事儿就这么成了！因此，这事儿容易。我猜，我心里杂念太多，以为那么要求人家，不知道怎么就不对。

到现在，我已经画了很多画儿，我已经到了这么一种造诣，最喜欢画裸体。据我所知，严格来说，那不是艺术，那是一种混合物。谁知道这混合物中的各种物质的百分比是多少？

我通过杰瑞认识的一个模特儿，曾经是《花花公子》杂志的花花女郎。她身材颀长，美艳无比。然而，她觉得自己太高了。这个世界上的每个女孩儿，瞧她一眼，都嫉妒得要死。在她进一个房间的时候，上半身得弯着进去。在她摆姿势的时候，我想教教她，请站起身来，因为她是如此优雅，如此耀眼。我终于说动她照着我说的做了。

她接着就有了另一种担忧：她的腹股沟儿那儿有些“凹坑儿”。我不得不找出一本解剖学书，给她看那是肌肉与肠骨的接合部，还为她解释，你不是在每个人身上都能看到那些“凹坑儿”的。要想看到，那必须一切都刚好合适，完完全全地合乎比例，就像她那样。我从她那儿了解

到，每个女人，无论她们多么漂亮，都担心自己的长相。

我想用彩色为这个模特儿画一幅画儿，用粉蜡笔，仅仅是为了做实验。我觉得应该先用炭笔勾勒轮廓，再用粉蜡笔覆盖。在我用炭笔勾完了之后，我不操心这画儿以后会是个什么样子了，我意识到这就是我画过的最好的画儿之一。我决定，这样就行了，别在这幅画儿上用粉蜡笔了。我的“经纪人”看到这画儿，想把它带走。“这幅画儿，你卖不出去，”我说，“它画在报纸纸上啊。”

“哦，别担心。”她说。

几个星期后，她回来了，带着这幅画儿，用漂亮的木头画框给装了起来，红色的镶边，金色的边框。这事儿够滑稽的，一定会让一般的艺术家们闷闷不乐——你给一幅画儿装了框子，这对它的改善也太大了。我的经纪人告诉我，某位女士，对这画儿整个着了迷，我的经纪人就把这画儿送到画框师那儿了。他告诉她，有一种特别的技术，来装画在报纸纸上的画儿：用塑胶使之饱和，这么捣鼓，那么捣鼓。因此，这个女士必须得遭受我画的这画儿带来的这些麻烦，然后呢，她还要让我的经纪人把画儿带给我看。“我想，这位艺术家或许想看看，它装了画框的时候，有多么可爱。”她说。

我肯定想看。有人从我的一幅画儿中得到了这种直接的快乐，这又是一个例子。因此，卖画儿，还真是件乐事儿。

有那么一段时间，城市里有脱衣舞饭店：你可以到那儿吃午饭或晚饭，女孩儿们光着上半身跳舞，跳着跳着，就一丝不挂了。有这么一个地方，离我住的地方也就是一英里半（约2.4千米），因此我经常到那儿。我坐在包厢里，在圆齿边线的纸上做一点儿物理计算。有的时候，我画一个跳舞的女孩儿，或者画一个顾客，仅仅为了练习。

我妻子格温妮丝（Gweneth），是个英国人，我到这么个地方，她态度端正。她说，“英国男人都有俱乐部可去。”因此，那儿就跟我的俱乐部似的。

那地方墙上挂着一些画儿，但我不是太喜欢那些画儿。那是用荧光性的颜料画在黑色的天鹅绒上的——有那么点儿丑——画的是一个正在脱衣服的女孩儿什么的。我有一张相当不错的画儿，那是我用我的模特儿凯西画的，于是我就把这画儿送给了饭店老板，好挂在墙上，他很高兴。

给了他这么一幅画儿，结果产生了一些有用的结果。老板对我非常友好，我的饮料一直是免费的。现在，我每次到这个饭店，一个女服务员就给我端来免费的“七翘”（7　Up）。我一边看女孩儿跳舞，一边做做物理学研究，备备课，或者画点儿什么玩意儿。如果我有点儿累了，我就看一会儿节目，回头再做点儿研究。老板知道我不想有人打扰，因此，如果有个喝多了的主儿凑合过来，要跟我说话，立刻就过来一个女

服务员把他支走。如果有个女孩儿过来，他就不多事儿了。我们关系很好。他名字叫乔诺尼（Gianonni）。

我的画儿在那儿展览，有另一个效果，大家都问他，这画儿是怎么回事儿。有一天，一个家伙走到我这儿来说：“乔诺尼告诉我，那画儿是你画的。”

“是啊。”

“很好。我想请您画幅画儿。”

“行啊，你喜欢什么？”

“我要的这幅画儿，得画一头长着男人头的公牛，正在向一个裸体女斗牛士冲击。”

“那个，呃，要是我知道这画儿派什么用处，那会对我有点儿帮助。”

“我的开业典礼用得着。”

“什么买卖的开业典礼啊？”

“按摩廊：你知道的，小私密房间儿，按摩女——明白这事儿？”

“对，我明白这事儿。”我不想画一头长着男人头的公牛，正在向一个裸体女斗牛士冲击，于是我就想说服他放弃这个念头儿。“那会对顾客留下什么印象？那会让女孩儿们有什么感觉？你想过吗？男人们到那儿去，你用这画儿，把他们搞兴奋了。你希望他们那么对待那些女孩儿？”

我没把他说服气。

“假定警察进来了，他们看到这幅画儿，而你声称这是一家按摩廊。”

“对对对，”他说，“你说得对。我改主意了。我想要的这幅画儿嘛，如果警察看它，对一个按摩廊来说，那没什么不合适的；但是，顾客一看，他就会明白点儿事儿。”

“那好。”我说。我们商定了60块钱的润笔，我就开始画这画儿。首先，我得琢磨，这画儿怎么个画法。我想啊，想啊，觉得还不如当初就依了他，干脆画个裸体女斗牛士得了！

最后，我琢磨出了怎么来画：我画个想象中的罗马年轻女奴，在为某个重要的罗马人按摩——或许是个元老院议员。因为她是个女奴，她脸上就有某种表情。她知道下面要发生什么事儿，而她也只能听天由命。

我在这画上花了不少劳动。我让凯西当模特儿。后来，我找到了另一个模特儿来画那个男人。我做了许多研究，模特费很快就已经到了80块。我不在乎钱，我喜欢受托作画儿这一挑战。最后，我画完了一幅画儿：一个肌肉强壮的男人，躺在一张桌子上，女奴在给他按摩。她穿着某种长袍，盖住了她的一个乳房，另一个乳房，裸着，我把她的那种听天由命的表情，表现得恰如其分。

我正准备着去交差，把我的大作给按摩廊送去，乔诺尼却告诉我，那家伙给抓起来了，下了大牢了。于是我就问这个脱衣舞饭店的女孩儿，帕萨迪纳这方圆之内，有没有好的按摩廊愿意挂我这幅画儿。

她们告诉我帕萨迪纳和周围几家按摩廊的名字和地点，还告诉了我这么些事儿：“如果你到了什么什么按摩廊，就说要找弗朗克——他是个挺不错的家伙。要是他不在，那就别进去。”还有：“别搭理艾迪。艾迪可不懂一幅画儿有什么用处。”

第二天，我把画儿卷起来，把它放在我汽车的后座上，我妻子格温妮斯祝我好运，我就出发去访问帕萨迪纳妓院，去兜售我的画儿。

就在我要去我名单上的第一家妓院的时候，我心里想，“你知道，我到其他地方之前，我应该先到原先那家按摩廊，说不定那儿还在营业呢，说不定新经理也要我的画儿呢。”我就去了那儿，敲门。门开了个缝儿，我看到了女孩儿的一只眼。“是熟客吗？”她问。

“不，不是，可你不想在门厅里挂一幅挺合适的画儿吗？”

“抱歉，”她说，“我们已经联系了一位艺术家为我们画画儿，他眼下正画着呢。”

“我就是那位艺术家，”我说，“你们的画儿，画好了！”

原来，那家伙在入狱之前，把我们的安排跟他老婆说了。于是，我就进去了，给她们看这幅画儿。

这家伙的老婆和他妹妹，现在操持着这个地方，不十分喜欢这画儿。她俩想让女孩儿们也来参谋参谋。我把画儿挂在墙上，就挂在休息室里，姑娘们都从后面不同的房间里走出来看，并且开始发表评论。

有个女孩儿说，她不喜欢女奴脸上的表情。“她看起来，不怎么乐，”她说，“她该笑才对。”

我对她说，“告诉我——你给一个家伙按摩着的时候，可他连看你也不看，你还会笑？”

“哦，不！”她说，“我觉得我真的就是她那副样子！但把这画儿挂起来，不是个事儿啊。”

我把画儿留在她们那儿了，但是我为这画儿反反复复担心了一个星期之后，她们决定不要这画儿了。原来，她们不想要这画儿的真正原因，是那个裸着的乳房。我解释说，我画这画儿，要比原来要求的节制得多，但她们说她们对这画儿的看法，和那个家伙的看法，有所不同。我想，这可够讽刺的，开了这么一家买卖的这些人，对一个裸露的乳房如此谨小慎微，真可博人一笑，我就把画儿拿回家了。

我那位做生意的朋友，达德利·赖特（Dudley Wright），看到这画儿，我就把这故事讲给他听了。他说："你应该把价码提高到三倍才是。艺术这玩意儿，真没人知道它值多少，因此呢，大家就想啦，'要是价码高，它的价值想必就大！'"

我说："你疯了！"但是，仅仅是为了逗乐儿，我买了一个20块钱的画框，把这画儿装起来，好准备着卖给下一个顾客。

有个家伙，在气象台干活儿，看到了我给乔诺尼的那幅画儿，问我有没有别的画儿。我邀请他和他老婆，到我家里楼下的"画室"来，他们问了那幅新装了框子的画儿。"那幅嘛，200块。"（我把60块乘以3，外加20块的画框费。）第二天，他们回来把那幅画儿买了。这就是说，按摩廊的画儿，最终挂在了一个气象预报员的办公室里。

有一天，一个警察突袭了乔诺尼的脱衣舞饭店，逮捕了几个脱衣舞女。有人想要乔诺尼停止脱衣舞表演，乔诺尼不想停。于是就起了一场大官司。这事儿，当地的几家报纸上都登着呢。

乔诺尼四处奔走，求顾客们为他作证，支持他。人人都找借口："我开了一家夏令营，要是家长们知道我到这么个地方来，他们就不会再把孩子送到我这儿来了……"或者："我做的是什么什么买卖，要是公众知道我溜到这儿来，我们会失去顾客的啊。"

我心里想："这里只有我是自由人了。我没什么借口啊！我喜欢这个地方，我愿意看到它继续开下去，我看不出脱衣舞有什么不对的。"因此，我对乔诺尼说："好的，我很高兴为你作证。"

在法庭上，这个大问题是，脱衣舞对社区而言，是可取的吗？——社区标准允许脱衣舞吗？

辩护律师试图把我弄成个社区标准的专家。他问我，我是否也去别的酒吧。

"去的。"

"平均而言，您每星期去乔诺尼饭店几次？"

"一个星期五六次吧。"（这一点都记录在案了：加州工学院的这位物理教授，一个星期六次去看脱衣舞。）

“乔诺尼饭店的顾客，都包括社区的什么样的人？”

“几乎什么人都包括：有一些干房地产的家伙，有一个家伙是市府的，加油站的一群工人，工程公司的一些家伙，一个物理学教授。”

“既然这个社区许多阶层的人都在看脱衣舞，都喜欢看，那么，您是否会说脱衣舞娱乐活动，对社区而言是可以被接受的呢？”

“我倒想知道，你说‘对社区而言是可以被接受的’，是个什么意思。没什么事儿，人人都接受。因此，为了使‘对社区而言是可以被接受的’这一说法成立，社区人口接受某事必须是多大百分比才成？”

这位律师建议了一个数字。其他律师反对。法官宣布休庭，他们在密室里待了15分钟，这才决定“对社区而言是可以被接受的”，意思是社区50%的人接受。

尽管事实上是我让他们把事儿弄得准确了，但我却没有精确的数字可作证据，于是我说，“我相信社区50%以上的人，都接受脱衣舞，因此，脱衣舞对社区而言是可以被接受的。”

乔诺尼暂时输掉了官司，但他的这个案子和与此相似的另一个案子，最终上诉到了最高法院。与此同时，他的饭店还在经营着，我得到了更多的“七翘”饮料。

大约是在那个时候，加州工学院做出了一些努力，以便培养起对艺术的兴趣。有人捐钱把一座破旧的植物科学大楼，改造成了艺术工作室。设备和材料买来了，供学生们使用，他们还从南非雇了一个艺术家，来组织和支持加州工学院的艺术活动。

各色人等都来教课。我把杰瑞·左提安弄来讲素描课，别的一个家伙来教版画，我想学这个。

这位南非艺术家来过我家一趟，看了我的画儿。他说，他认为举办一次个人画展，是很有意思的。这次，我可自欺欺人了：如果我不是个加州工学院的教授，大家就不会觉得我的画儿有价值。

“我的一些比较好的画儿，都卖了，给那些人打电话，我会觉得不安。”

“你不必担心，费曼先生，”他给我打气儿。“电话不必你打。一切都由我们来操办，画展一定会办得像模像样，没有差错。”

我给了他一个名单，那些人，都买过我的画儿，他们很快就接到了他的电话。“我们了解到您那里有一幅阿飞。”

“啊，是的！”

“我们正在筹划一次阿飞画展。我们在考虑，您是否可以把它暂时借给我们一用。”当然，他们很乐意借。

画展在加州工学院教职工俱乐部“雅典娜神庙”的地下室里举行。一切都跟真事儿似的：所有的画儿都有标题，那些受托从拥有者那儿借来的画儿，都有所有权确认说明：例如，“乔诺尼先生热情出借。”

有一幅，画的是艺术班的那个金发碧眼的漂亮模特儿，那本来是我打算研究阴影效果的：我把灯光放在她腿的高度，放得斜一点儿，灯光向上射。她坐着的时候，我想照实际情形画阴影——她的鼻子颇不自然地在她的脸上投下了一道影子——这不是那么难看。我把她的躯干也画得很好，因此你也可以看到她的乳房，以及乳房投下的影子。我把这幅画儿和其他展出的画儿凑在一块儿，名之曰“居里夫人在观察镭的辐射”。我意在传达的信息是：没人把居里夫人看成个女人，没人把她看成一个秀发飘然、赤裸着乳房的女性。大家一看居里夫人，只想着镭。

展览之后，一位著名的工业设计家亨利·德瑞法斯（Henry Dreyfuss），邀请了各色人等到他家参加一个招待会——那个捐钱赞助艺术的女人，加州工学院的校长和他妻子，等等。

一个艺术爱好者也来了，开始跟我聊：“告诉我，费曼教授，你画画儿，是用照片还是用模特儿？”

“我从来都是直接用模特儿来画。”

“呃，您是怎么让居里夫人为您摆姿势的？”

大约在那个时候，“洛杉矶县艺术博物馆”（Los Angeles County Museumof Art）有个看法，和我的相似：艺术家对科学一点儿也不理解。我的看法是：艺术家不理解自然的内在普遍性和自然之美，不理解自然规律（因此，不能在他们的艺术中描绘这类东西）。这个博物馆的想法是：艺术家应该更多地知道技术，他们应该更熟悉机械以及科学的其他实用功能。

这个艺术博物馆制定了一个计划，他们将让当时一些真正好的艺术家，到各种各样的公司去，这些公司自告奋勇为这个计划出时间、出钱。艺术家们将到这些公司四处溜达，直到他们看到什么有意思的东西，好用在他们的作品当中。博物馆认为，如果有个人明白一些技术上的事儿，那么艺术家参观公司的时候，他就可以时不时地做个艺术家的联系人什么的。因为他们知道，向人家解释事儿，是我的拿手好戏。说到艺术，我也不完全是个二百五（实际上，我想他们知道我在努力学画画儿）——无论怎么说吧，他们问我愿不愿意干这个差事，我同意了。

和艺术家去参观公司，乐事儿很多。经常发生的事儿，是某个家伙给我们看一根管子，里头放电火花儿，蓝莹莹的，曲曲折折的，漂亮。艺术家们全都兴奋了，问我，在展览的时候，怎么用用这个东西。搞这

个东西，需要什么必要的条件？

艺术家都是些非常有趣的人。他们当中有一些，绝对是冒牌货：他们自诩为艺术家，别人也都承认他们是艺术家。但等你坐下来跟他们聊聊，他们简直就是言语无味儿！有个家伙，最是突出，是个最大的冒牌货，穿得总是滑稽，戴着一顶好大的圆顶硬礼帽。他回答你的问题的时候，用的是人人不懂的方式。等你问他用的一些词儿是个什么意思，以便搞清楚他刚才说的那些话是个什么意思的时候，我们在另一个方向上又坠入了云里雾里了！最后，他对艺术和技术展览的唯一贡献，是他的一幅自画像。另一些艺术家，我跟他们说话，开始的时候，你听不出什么意思来，但他们会不遗余力地为你解释他们的想法。有一次，和罗伯特·欧文（Robert　Irwin）一起，我到了个地方，这也是计划的一部分。那是一次为期两天的旅行，费了好大劲，反反复复地讨论了很多，我终于理解了他试图向我解释的东西，我认为那很有意思，也很奇妙。

还有些艺术家，对真实世界，绝对没有任何看法。他们以为科学家是某种大魔术师，他们什么东西都搞得出来，说的话像是这个样子："我想做一种三维的画儿，里头的形象是悬在半空中的，而且还发光，一闪一闪的。"他们制造他们希望的那样一个世界，但制造什么是有道理的，制造什么是胡扯淡的，他们是没有什么理解的。

最后，有一个展览，他们要求我当评委，来评判艺术品。尽管那儿有一些好东西，艺术家通过参观公司而得到灵感的好东西，但我认为，大多数的好艺术品，是那些在最后一分钟逼出来的东西，和技术实在风马牛不相及。评委会的其他成员全都不同意我的看法，我发现自己处境尴尬了。艺术批评，我不擅长，我一开始就不该当这个评委。

在县艺术博物馆里，有个家伙，名字叫毛里斯·杜克曼（Maurice Tuchman），在谈到艺术的时候，确实知道自己在讲什么。他知道我在加州工学院搞的那个个人画展。他说，"你知道，你再也不会画画儿了。"

"什么？胡说！我为什么再也不……"

"因为你已经搞过个人画展了，而你不过是个业余画家。"

尽管自那以后我还是画画儿，但我不像以前那么卖力、那么投入了。我也再没卖过一幅画儿。他是个聪明的伙计，我从他那儿学到了不少。如果我不是那么固执，我还可以学得更多。

电是火吗？

20世纪50年代早期，我暂时得了一种中年病：习惯于就科学发表哲学性质的讲话——科学是怎么满足好奇心的，科学怎么给你一个新的世界观，科学怎么赋予人做事情的能力，科学怎么给人力量——问题是：

从新出现的原子弹这个东西来看，给人那么大的力量，是个好主意吗？我还思考过科学和宗教之间的关系。大约是在那个时候，我得到邀请参加在纽约的一个会议，讨论“平等的伦理学”问题。

在长岛那地方，这些老人以前曾经在那儿开了个会，今年他们决定让一些年轻点儿的人加入进来，来讨论他们在另一次会议上搞出来的一些论文。

在我赴会之前，他们到处散发一个列表：“这里是一些您或许有兴趣来读的书，请告诉我们你希望别人也来读的书，我们将在图书馆里收藏这些书，好让别人也来读。”

于是我就有了这么一个奇妙的书籍列表。我开始读第一页：其中的书，我一本也没读过，我很不自在啊——我不入流啊。我看第二页：我一本也没读过。整本列表看完了，我发现，这些书，我一本没看。我必定是个白痴，一个文盲！里头有好书，如托马斯·杰弗逊的《论自由》（On Freedom）之类的书。其中的作者，我也没读过几个。有一本书是海森堡[70]写的，一本是薛定谔写的，还有一本是爱因斯坦写的，但像爱因斯坦的《我的晚年》（My Later Years）和薛定谔的《生命是什么》（What Is Life），和我以前读过的东西有所不同。因此，我觉得自己真是一筹莫展了，我不该参加这个会议。或许我可以静悄悄地坐着听。

我去参加了第一次好大的见面会，一个家伙站起来，解释说，我们有两个问题要讨论。第一个问题，有点儿云山雾海的——是关于伦理学和平等的什么玩意儿，但我听不明白这问题到底是什么。第二个问题，是“通过我们的努力，我们将展示一条道路，一条来自不同领域的人们之间可以进行对话的道路。”那儿还有个国际律师，一个历史学家，一个耶稣会的牧师，一个犹太教的拉比，一个科学家（我），等等。

好了，我的那个逻辑头脑立刻就这样转起来了：第二个问题，我完全不必在意，因为如果那行得通，它就行得通；如果它行不通，它就行不通——如果我们没什么可谈的，那么我们之间可以对话，这也用不着证明了，也用不着讨论了！因此，主要的问题是第一个，可那个，我又不懂。

我正想举手说：“你能不能把第一个问题定义得好些？”但我当时想：“别了，我不学无术。我最好还是听着点儿。我不想一开始就添乱。”

我所在的那个小组，应该讨论“教育平等的伦理学”。在我们小组的几次会议中，那个耶稣会牧师总在谈“知识的分崩离析。”他说：“教育平等的真实问题，是知识的分崩离析”。这位耶稣会士回顾了13世纪，其时天主教会主宰着全部的教育，整个世界都是简朴的。存在一个上帝，一切都来自上帝，一切都井然有序。可是，今天，理解任何事情，都不

那么容易了。因此，知识已经分崩离析了。我觉得，“知识的分崩离析”和“一切”没关系，但他从来也没定义什么是“一切”，因此我没办法证明他的话。

最后，我说：“这个伦理学问题，怎么就和知识的分崩离析扯上了关系呢？”他呢，只是用大团大团的烟雾来回答我，我说：“我听不懂。”可是别人都说听得懂，而且他们还努力为我解释呢，但他们没办法给我解释清楚！

因此，这个小组里的人，就让我把我认为知识的分崩离析不是一个伦理学问题的理由写下来。我回到我宿舍，仔仔细细地写，尽量写得好，我认为“教育平等的伦理学”这个主题或许是个什么问题，我还举了各种各样的问题实例，我认为我们或许应该讨论这些东西。比方说，在教育中，我们增加差异，这是合乎道德的吗？然后，在又举了几个例子之后，我继续说，“知识的分崩离析”之所以是个麻烦事儿，是因为世界的复杂性使我们很难理解事物，照我对这一主题范围的定义，我看不出知识的分崩离析，怎么就和任何近似于教育平等的伦理学问题的任何东西有关系。

第二天，我把我的论文带进了会场，那个家伙说：“是的，费曼先生已经提出了一些非常有意思的问题，我们应该讨论这些问题，我们暂且把这些问题放一放，留待将来可能的时候再讨论吧。”他们完全没能理解我的主旨。我是想把问题定义清楚，然后表明为什么“知识的分崩离析”和我们的问题没任何关系。在那次会议上，没什么人能够说清楚任何事儿，原因就在于他们还没有把“教育平等的伦理学”这个问题定义清楚啊，因此，没人确切地知道他们该谈什么。

有个社会学家，写了一篇论文给我们大家读——这东西是他提前写的。我开始读这个鬼东西，我的眼珠子都要掉下来了：我简直搞不清楚它说的是个什么子丑寅卯！我琢磨着，之所以是这个样子，是因为我不曾读过列表上的那些书。我有一种颇不自在的感觉，“我学养不厚啊”，直到最后，我对自己说，“我得停下来，只慢慢儿读一个句子，那样我就能琢磨出它究竟是个什么意思。”

于是我就停下来——随便停在那儿——然后读下一个句子，读得非常仔细。我不能精确地记得那个句子，但它非常近似于这么一个东西：“社会大众的每一成员，常常是通过视觉的、符号的渠道来接受信息的。”我来来回回读了好几遍，还把它翻译成别的句子。你知道它是个什么意思？“人们阅读。”

然后，我过渡到下一个句子，我发现我也能翻译这个句子。结果它就变成了这么一种空虚无聊的玩意儿：“有的时候人们阅读，有的时候人们听收音机。”如此等等，但是它写得如此花里胡哨，我开始的时候都看不明白，等我终于把它破译了之后，它却空无一物。

那次会，只有一件事儿，是愉快的或者好玩儿的。在这次会议上，每一个家伙在每一次全体会议上说的每一个字儿，都太重要了，他们弄了速记打字员在那儿，把每一件混账事儿都打了下来。在第二天的某个时候，那个速记打字员走到我这儿说："您什么职业？肯定不是个教授。"

"我是个教授，"我说。

"什么教授？"

"物理学的——科学。"

"哦！难怪！"他说。

"难怪什么？"

他说："您瞧，我是速记打字员，把人家说的什么都打下来。别的伙计讲话的时候，他们说什么，我就打什么，但我听不懂他们在说什么。但每次您站起来问个问题，或者说什么东西，我完全明白您是什么意思——明白问题是什么，您说的是什么——因此，我还以为您不可能是教授！"

到了一定的时候，有个特别的晚宴，一个神学院的院长，一个很好的、很犹太的人，发表了一个演说。那是个很好的演说，他也很会说话，因此，尽管在我现在说这事儿的时候，那演讲听起来是发疯，可在当时，他的主要思想，听起来却是完全明显而真实。他讲的是各国福利上的巨大差别，这引起了嫉妒，导致了冲突，现在，既然我们已经有了原子武器，那么无论是什么样的战争，我们都在劫难逃，因此追求和平的正确出路，在于确保每个地方不存在差别，因为在美国我们有的东西过多了，我们就应该把几乎全部的东西都放弃，都送给别的国家，直到大家扯平了为止。大家都在听这个，我们全都充满了牺牲的情感，大家都认为我们应该这么办。但是，在回住处的路上，我恢复了理智。

第二天，我们小组的一个家伙说，"我认为昨天晚上那个演讲，太好了，我们大家都应该签字认可，它应该成为我们这次会议的纲领性文件。"

关于平均分配一切东西的这一思想，我开始说，它建立在这么一种理论上：全世界只有X量的东西，不知怎么我们首先从比较穷的国家那儿把东西抢了过来，因此，我们应该把东西还给人家。但是，这个理论，没有考虑到国家差别的真正原因——即用来种植作物的新技术发展，用来种植作物和做其他事情的机械发展，以及所有这些机器需要资本的集中这一事实。问题不在于东西，而在于制造东西的力量，那才是重要的。但我现在意识到，那些人不在科学之中，他们不理解这个。他们不理解技术，他们不理解自己的时代。

这次会议使我神经大受刺激，我在纽约认识的一个女孩儿不得不让我安静下来。“瞧你，”她说，“你都哆嗦呢！你绝对变成了个大傻瓜！有什么大不了的啊，别把事儿看得那么严重。退后一步，把事儿看清楚了。”于是我就思考这次会议，它多么傻，它多么坏。但是，如果有人要求我再参加那种东西，我将羞臊得像个疯子似的逃之夭夭——我的意思是，零！不！绝对不参加！直到今天，我仍然收到参加那种玩意儿的邀请函。

到最后评价这次会议的时候，别人都说，他们从本次盛会得到了那么多的教益，这是一次成功的大会，诸如此类。他们问我的时候，我说，“这次会议，比罗尔沙赫氏测试（Rorschachtest）[71]还糟糕：那儿有一团毫无意义的墨迹，别人问你，你认为你看到了什么，等到你告诉他们你看到了什么，他们就开始跟你吵闹！”

比这更坏的是，在会议结束的时候，他们要去开另外一个会议，但这次有公众参加进来，负责我们小组的那个家伙有胆量说，因为我们已经有了这么多收获，再说也没有什么进行公众讨论的时间了，所以我们干脆告诉公众我们已经得到的收获。我眼珠子都要爆出来了：我认为我们一点混蛋收获也没有嘛！

最后，在我们讨论我们是否已经发展出了一种在来自不同学科的人们之间进行对话的途径这一问题——我们的第二个基本“问题”——的时候，我说，我注意到某种有意思的事儿。我们每个人都谈了我们所认为的“关于平等的伦理学”是个什么东西，都是从我们自己的观点来谈的，却不在意别的家伙的观点。比方说，这位历史学家建议，理解伦理学问题的途径，是历史地看那些问题是怎么发展起来的；国际律师建议，搞这个的途径，是看人们在不同的情况下是怎么发出不同行动的，以及是怎么做安排的；这位耶稣会牧师，总是提起“知识的分崩离析”；我呢，作为科学家，建议我们应该把这个问题单独来处理，在方式上应该像伽利略做实验的那种技巧，如此等等。“因此，在我看来，”我说，“我们还完全没有什么对话。恰恰相反，除了一团乱麻，我们什么也没有！”

我理所当然地遭到了攻击，来自四面八方的攻击。“难道您不认为秩序是从混乱中产生的吗？”

“啊，那个，作为一个一般原则，或者说……”我搞不明白这怎么扯上了“秩序是从混乱中产生的吗”这个问题。是，不是，这怎么说呢？

在那次会议上，傻瓜有的是——自负而浮夸的傻瓜——这种傻瓜，能把我逼得上墙。一般的傻瓜，无可指责。你可以跟他们谈，努力帮助他们把事儿搞明白。可自负而浮夸的傻瓜——就是那种又傻，又掩盖他的傻，并且一门心思地要给大家留下深刻印象的傻瓜，他们连哄带骗，以此显示他们多么有能耐——那个，我无法忍受！一般的傻瓜，并不装模作样；诚实的傻瓜，无可指责。但是，一个不诚实的傻瓜，可怕！那就是我在那次会议上的收获，自负而浮夸的傻瓜，都成串儿了，我心烦

意乱。我再也不去让自己心烦意乱了，因此我再也不参加跨学科会议了。

脚注：在开会期间，我待在“犹太教神学院”，在那里，年轻的拉比们——我认为他们是正统教派——在做研究呢。因为我有犹太背景，他们告诉我的那些关于犹太法典的事儿，我也略知一二，但我从来没看过犹太法典。这法典很有意思：大开本，页角上的小方框里，是原文的犹太法典，然后在一种L形的页边上，围绕着这个方框，是不同人写的注解。犹太法典已经发展了，一切都经过反反复复的讨论，讨论得非常细致，用的是一种中世纪的推理方式。我认为，那些注解，到13世纪或1世纪4或15世纪，就停了——没有什么现代的注解。犹太法典是一本奇书，是一只装着各种各样事儿的大罐子：琐屑的问题，困难的问题——例如，关于教师的问题，如何教学的问题——接着又是一些琐事，等等。学生们告诉我犹太法典从来没有被翻译为其他文字，这事儿透着怪，因为这书是这么有价值。

有一天，两三个年轻的拉比来找我，说：“我们意识到，在现代世界上，要是不知道科学的事情，我们学不成拉比的，因此我们想问您一些问题。”

当然，发现科学的地方，何止千万，哥伦比亚大学就在附近嘛，但对他们要问什么样的问题，我感兴趣。

他们说：“那个，比方说，电是火吗？”

“不是，”我说，“但……干嘛问这个？”

他们说，“犹太法典里说，‘安息日汝不得举火，’因此，我们的问题是，在安息日我们可以用电器吗？”

我深感震惊。他们对科学完全不感兴趣！科学影响他们生活的唯一方式，是他们或许能更好地解释犹太法典！他们对外部世界、对自然现象，没兴趣。他们唯一感兴趣的事儿，是消化犹太法典提出的问题。

后来，有一天——我猜是安息日——我去用电梯，有个家伙站在电梯旁边。电梯来了，我进去，他也跟我进来了。我说：“几楼？”我伸手要去按电钮。

“不，不！”他说，“该是我为您按电钮的。”

“什么？”

“是的！这儿的小伙子们说，安息日是不可以按电钮的，因此我一定要为他们按电钮。您知道，我不是犹太人，所以我按电钮没关系。我站在电梯边儿，他们告诉我几楼几楼，我就为他们按电钮。”

唉，这真是让我闹心，于是我决定在一场逻辑讨论中把这些学生置于尴尬境地。我是在一个犹太家庭长大的，因此我知道他们用的那种吹毛求疵的逻辑，我想：“这是个乐子！”

我的计划是这样的，我一开始就会问：“犹太观点是任何人都可以采纳的观点吗？因为，如果不是，那么这种观点肯定就不是对人类真有价值的东西……”于是，他们会说，“是的，犹太观点任何人都可以采纳。”

然后，我会牵着他们的鼻子再走上一圈儿，我问：“一个人雇另一个人来做对自己来说是不道德的某事，是道德的吗？比方说，你们会雇一个人来为你们抢劫吗？”慢慢地，非常小心地，我不停地把他们往套子里引，直到我把他们——逮住！

你知道真正发生了什么事儿？他们都是犹太教学生，是吧？他们比我强十倍！他们一看出我能把他们赶到窟窿里，就挣扎，扭动，挣扎——我记不得他们是怎么挣扎，怎么扭动的——挣脱了！我还以为我遇到了个原创的观点呢——呸！他们的观点，在犹太法典里，已经讨论了好几个时代了！他们收拾我，就跟吃馅儿饼那么容易——他们完全挣脱了困境。

最后，我想让这些犹太教学生确信，他们在按电梯按钮时出现的那种让他们不安的电火花，不是火。我说“电不是火。电不是化学过程，火是。”

“哦？”

“当然，在火中的原子之间，是有电的。”

“啊哈！”他们说。

“世界上发生的任何其他现象里，都有电。”

我甚至还建议了一个消除火花的可行办法。“如果那个东西让你闹心，你可以在开关上加一个电容器，那样的话，电断开、接上，都不会有任何火花——任何地方都不会有。”但不知道是什么原因，他们也不喜欢这个主意。

这实在叫人失望。他们待在我这儿，慢慢缓过神儿来，仅仅是为了更好地解释犹太法典。你想想啊！身在这么一个现代化的时代，那些家伙在研究，以便走向社会，去干点儿事儿——去当个拉比——他们想到科学或许有意思的唯一方式，是他们那些古老的、狭隘的、中世纪的问题，稍稍受到了某种新现象的骚扰。

当时还发生了另一件事儿，也值得在这里提一提。犹太教学生和我仔细讨论过的问题，有一个是为什么在某些学术的事情上，比方说理论物理学方面，犹太孩子在其中所占的比例，高于一般人口在其中所占的

比例。犹太教学生认为，其原因在于，犹太人有着尊重学习的历史：他们尊重他们的拉比，拉比实际上是教师，他们也尊重教育。犹太人一直在家庭里把这种传统传承了下来，因此，如果一个小伙子是个好学生，那他就和好的足球队员一样好，即使不更好。

就在当天下午，他们提醒我这种说法有多么真实。我应邀到了一个犹太教学生的家里，他把我介绍给他妈妈，她刚从华盛顿回来。她两手一击，喜出望外，说："哎哟喂！我这一天，算是功德圆满了。今天，我见到了一位将军，还有一位教授！"

我心知肚明：没有多少人认为见到一位教授，和见到一位将军一样重要、一样好。因此，我猜，学生的那种说法，真有道理哟。

书好书坏，看看封面

战争之后，物理学家常常被召到华盛顿，给各政府部门，特别是军事部门，献计献策。何以如此？我猜是这样：由于科学家已经制造了那些如此重要的原子弹，军方就觉得，我们这些人，在某些事情上，还可以有其他用处。

有一次，有人要求我在一个委员会里当差，这个委员会要为军方评估各种各样的武器，我写了封回信，解释说，我只是个理论物理学家，我不知道任何关于军队用的武器的事儿。

军队的反应是，根据他们的经验，他们已经发现理论物理学家，在他们决策的时候，是非常有用的，因此，我可否再做考虑？

我又回了封信，说我实在一无所知，我怀疑我能帮他们什么忙。

最后，我收到了陆军部长的一封信，信中建议了一个折中方案：我去参加第一次会议，我可以听听，看我能不能有所贡献。然后呢，我再决定我是否继续干下去。

我说，我去，当然。我还能怎么办啊？

我去了华盛顿，我参加的第一个玩意儿，是一个鸡尾酒会，好认识各位。那儿有将军和陆军来的其他重要人物，大家都在聊着。这很令人愉快。

一个穿军服的家伙朝我走来，告诉我，物理学家给军方献计献策，军队是很高兴的，因为军方问题很多。其中的一个问题，是坦克耗油太快，所以跑不远。因此，问题就是：怎么在坦克跑着的时候给它加油？这个家伙，当时脑袋里有个主意：既然物理学家能从铀里捣鼓出能量，那么我能不能搞出一个办法，把二氧化硅——沙子，泥土——用作燃料？假如此事可行，那么只需要在坦克下面装个小铲子，它一往前走，

铲子就挖土，把土当燃料！他觉得这主意相当伟大，我需要做的事儿，不过是搞出具体的细节而已。我想，这就是我们次日开会讨论的那类问题了。

我去开会，注意到在鸡尾酒会上把我介绍给大家的那主儿，就挨着我坐着。他显然就是一个受命跟在我屁股后面的奴才。我的另一边儿，是一个高级的将军，我以前听说过。

在这次会议的第一次会议上，他们谈了些技术上的事儿，我稍微评论了几句。但后来，快到会议结束的时候，他们开始讨论后勤方面的某个问题，这我就一无所知了。这问题是要琢磨出，在不同时间，在不同地点，你应该有多少东西。尽管我努力想闭紧自己的嘴，但人处在那种情况中，你跟这些“重要人物”围坐一张桌子，讨论这些“重要的军国大计”，你就是不能把嘴闭上，尽管你什么也不知！因此，我在那次讨论中，也发表了一些评论。

下次咖啡时间，那个跟牧羊犬似的受命不离我左右的家伙说：“您在讨论时说的那些事情，给我留下了非常深刻的印象。那确实是一个重要的贡献。”

我沉吟片刻，思忖我对后勤工作的“贡献”，意识到，一个在商店里负责为圣诞节订货的家伙，在琢磨那种问题的时候，会比我更在行。因此，我的结论：①如果我确实有所贡献，那是瞎猫撞到了死耗子；②这种事儿，任何别人都做得来，但大多数比我都做得好，以及③这种恭维应该让我清醒一下了：实际上我贡献不了多少。

他们迅即在会上决定，他们最好是讨论一下科学研究的组织方式，（比方说，科学发展应该归工兵团管还是归军需处管？）而不是讨论具体的技术问题。我知道，如果我有希望做出任何真正的贡献的话，那也只能是在某些具体的技术问题上，我实在不知道怎么组织军队中的研究。

直到那时，我也没让这次会议的主席——就是那个邀请我来参加会议的大腕儿——知道我对这种情况的感觉。在我们收拾行囊要走的时候，他满面微笑地对我说：“你这就跟我们同舟共济了，那么，下次会议……”

“不，我不来了。”他脸色顿时为之一变，这我看得出来。他很吃惊我在做出了那些“贡献”之后，竟然会说不。

20世纪60年代初，我的许多朋友仍然在向政府献计献策。与此同时，我没什么社会责任感，尽可能拒绝到华盛顿去。在那年头儿，这是需要一定的勇气的。

那时我为大学新生开了一系列物理课，在其中的一门课讲完之后，帮助我在上课时做演示的汤姆·哈维（Tom Harvey），说：“你可得看看

课本里的数学是怎么回事儿！我女儿带回家好多发疯的玩意儿！”

我没把他的话当回事儿。

但第二天我接到个电话，是帕萨迪纳这儿的一位颇有名气的律师诺瑞斯（Norris）打来的，当时他是“州教育委员会”的人。他问我愿不愿意为“州课程编制委员会”服务，这个委员会得为加利福尼亚州选择一些新课本。你知道，这个州有一项法律，全部公立学校的所有孩子用的课本，都必须是州教委选择的，因此他们设立了个委员会来检查课本，向他们提出建议应该选哪些书。

原来，许多课本都是根据教算术的新教学法（他们称之为“新数学”）来编写的。因为通常看这些书的人，只是老师和主管教育的官员，他们认为，让一个在科学上运用数学的人帮忙评价课本，会是个好主意，这样的人知道最终产品是什么，也知道我们教数学是为了什么。

我当时不跟政府合作，一定有负疚感，因此我同意参加这个委员会。

立刻，我就开始接到出版社的信和电话。他们说的是这么些话，“我们很高兴获悉您在委员会里，因为我们确实需要一位懂科学的人……”还有，“委员会有一位科学家是很好的，因为我们的课本就是以科学为指针……”但他们还说这样的话，“我们愿意向您解释我们的课本……”以及“我们很乐意以任何力所能及的方式帮助您来评估我们的课本……”这在我看来是发疯。我是个客观的科学家，在我看来，孩子们在学校里得到的唯一东西就是课本（教师有教学指南，我也得看）。出版公司的多余的解释，是捣乱。因此，我不想和任何出版社说话，我总是这么回答：“你们不必解释，我相信书会自己说话。”

我代表一个区，这包括洛杉矶的大部分地区，只是洛杉矶市区除外。洛杉矶市区的代表是一位很好的女士，在洛杉矶学校系统工作，名字叫怀特豪斯（Whitehouse）夫人。诺瑞斯先生建议我应该跟她见见面，看看委员会干的是什么，怎么干。

怀特豪斯夫人开始告诉我他们下次会议要谈的事儿（他们已经开过一次会，我任命得晚）。“他们要讨论数字计算的问题。”我知道那是什么意思，但后来知道那是他们称之为整数的东西。每种东西，他们都另有名称，所以我一开始就麻烦不少。

她告诉我，委员们通常是怎么来给课本打分的。每本书，他们会收到好些册，然后分给他们区里的许多老师和官员。然后，他们收报告，报告上有这些人对这些书的看法。因为我不认识很多老师和官员，还因为我觉得我得自己读那些书，我才能拿得准在我看来怎么样，所以我宁肯亲自读书。（我区里有些人，早就希望看这些书呢，希望有机会发表自己的意见。怀特豪斯夫人建议把这些人的报告，和她的报告放在一起，那样他们会感觉舒服点儿，我也不必担心他们发牢骚了。他们满

意，我也没惹很多的乱子。）

几天后，书库的一个家伙打电话给我，说："我们准备着给您寄书了，费曼先生。总共有300磅（约136.1千克）。"

我犯晕了。

"没关系，费曼先生。我们会找个人帮你看书。"

我琢磨不出你怎么帮我看书：你或者是自己看，或者是不看。我专设了一个特别的书架，放在楼下我书房里（那些书摞起来有5米多高），然后就开始读所有这些在下次会上要讨论的书。我们先从小学课本开始讨论。

这是个相当大的活儿啊，我一天到晚在地下室里工作。我妻子说，那段时间，她好像住在一座火山上。这火山会安静一阵子，可突然之间，"轰隆隆隆隆隆隆隆隆隆隆隆！"——下面的火山就会有一个大爆发。这原因是那些课本太稀松。满纸荒唐言，都是急就章。那些书倒是想严格一些，但用的那些例子（如用街上的汽车来阐述"集"的概念）是牵强的，总有些词不达意，定义不严格。一切都有那么点儿含糊其辞——写书的人不够聪明，不理解"严格"是个什么意思。他们胡乱编造。他们在教某种自己也不明白的东西，而且，事实上，在那个时候，那些东西对孩子们也没用处。

我明白他们意欲何为。在苏联放了卫星之后，许多人认为我们落后于他们，有人就让一些数学家出谋划策，怎么运用非常有趣的现代数学概念来教数学。这个目的是想提高那些觉得数学很乏味的孩子们的数学水平。

我给你一个例子：他们要讨论不同的进位制——五进制，六进制，等等——来表明不同的进位制是可能的。这对那些能够理解十进制的孩子来说，或许是有趣儿的——一种娱乐大脑的东西。但在这些书里，他们搞的那一套，结果是让每一个孩子必须学会另外一种进位制！紧接着，通常会有的那种恐怖就来了："将下列七进制的数字，翻成五进制的数字。"把一种进位制的数，翻成另一种进位制的数，是吃饱了撑的。要是你会做，或许是个乐趣；要是你不会，就别理会它。这事儿没意义。

无论如何，我在看所有的书：所有的书，没有一本说过在科学中运用数学的事儿。如果有什么关于算术的用处的例子的话（大多数时候，那例子都是这种抽象的、新鲜的、现代的胡说八道），却是说的买邮票的事儿。

最后，我看到的一本书，说："数学以许多方式运用在科学当中。我们将给你一个天文学的例子。天文学是关于星体的科学。"我翻过这一页，它说："红色的星温度有4000开，黄色的星温度有5000开……"——到目前为止，还好。它继续说："绿色的星温度有7000开，蓝色的星温

度有10000开，紫色的星温度有——（一个很大的数）。”没什么绿色的或者的紫色的星啊，但和其余的星相关的数字，大体算对。那是马马虎虎的对——但是，麻烦已经出现了！满篇都是这种搞法：一切都是由某个并不知道他自己在讲些什么的主儿写的，因此总是有一些小错误！用这种课本，写课本的人又不十分知道他们在讲什么，我们怎么可能教得好啊，我不能理解。我不知道为什么，但书是稀松的。普遍性的稀松！

话说回来，这本书还是让我高兴的，因为把数学运用到科学上，这是第一本。等我读到星体的温度的时候，我有那么点儿不高兴，但我不是非常不高兴，因为它多少还算是对的——它只是例子错了。接着却出现了一串错误。它说，“约翰和他爸爸出去看星星。约翰看到了两颗蓝色的星和一颗红色的星。他爸爸看到了一颗绿色的星，一颗紫色的星和两颗黄色的星。约翰和他爸爸看到的星星的温度一共是多少度？”——我厌恶之极，要爆炸了。

我妻子该说起楼下的火山了。那只是一个例子：那样的东西持之以恒啊。持之以恒的荒唐啊！把两颗星的温度加起来，是吃饱了撑的。没人曾经干过这样的事儿，除非接着求两颗星的平均温度，或许是例外，但不是要发现所有星体的温度总和！可怕！它不过是个让你做加法的游戏，他们也不理解自己在讲什么。那就好像读一个有几个排版错误的句子，接着，突然一整句都印反了。这种数学与此相似。简直没指望了！

然后，我去参加我的第一次会议。别的委员已经给一些书打了某种分数，他们问我，我的分数是怎么打的。我的分数经常和他们的不同，他们就问，“您为什么给那本书打分打得那么低啊？”

我就说，那本书的毛病，是哪一页上的这个、这个——我做了笔记。

他们发现我是某种金矿：我告诉他们，说得详详细细，在所有的书里，什么是好的，什么是不好的。我打的每一个分数，都有根据。

我问他们为什么给那本书打分打得那么高，他们就说：“让我们听听您对这本书的想法。”我从来也没发现他们是按照什么方式来打分的。他们倒不停地问我是怎么想的。

我们检查到某一本书，它是一个公司出版的三本一套的小学课本中的一本，他们问我对这本书的看法。

我说：“书库没给我寄这本书，但另外两本不错。”

有个人还要重复这个问题：“您对这本书有什么看法？”

“我说过，他们没给我寄那本，所以我对它没法判断。”

书库的那人在那儿，他说：“对不起，我可以解释这件事儿。我没给

您寄那本书，是因为它还没写完。有个规定，就是你必须在某个时间之前把书都送来，那家出版社得晚送几天。因此他们只把封面发给我们，里头都是白纸。出版公司写了个条子来表示歉意，并希望他们那一套三本书能够列入考虑之中，虽然第三本要晚一些。”

我却发现，某个委员给那本无字之书也打了分！他们不相信那是本空白书，因为那本书有分数啊。事实上，那个分数比另外两本还高一点儿呢。书里空空如也，这个事实竟然和分数无关。

我相信，出这种事儿，其原因在于这个制度就是这么个方式。在你把书分发到整个这个地方的一些人手里的时候，他们忙，他们马虎，他们是这么想的，“哎呀，反正有那么多人都在读这本书嘛，打多少分无所谓。”他们就信手画上个分数——至少有些分数是这么打的，不是全部，但有些是这么打的。然后，你收到了报告，你不知道为什么这本特殊的书得到的报告比别的书少——于是你就把你得到的报告上的分数一平均，你没把没给你报告的那些人打的分平均在内——就是说，或许一种书发下去了十本，这本书有六个人写了报告——于是你就把写了报告的人打的分数一平均；你没有把没写报告的人的分数也平均了，于是你得到了一个看似合理的分数。这种一直在求平均数的过程，忽视了一个事实：在那本书的书皮之间，绝对是空空如也！

我之所以搞出了这么一个理论，是因为我看到了在课程编制委员会里发生的事儿：那本无字书，十个委员中有六个写了报告。可是，别的书，十个委员中有八九个写了报告。他们把六个分数平均一下得到的分数，和把八九个分数平均一下得到的分数，一样好。发现给那么一本书也打了分，他们非常尴尬，这事儿却给了我更多的自信。原来其他委员把大量工作花费在发书和收报告上，再就是去开会。在会上，出版社在他们看那些书之前，为他们解释那些书。委员会中，只有我自己一个人看了全部的书，也没采纳从出版社那里来的任何信息，除了课本之外，而课本是最终进入学校的东西。

想搞清楚一本书是好是坏，是仔细地去读，还是从许多漫不经心的人那里收报告，这个问题和那个有名的古老问题有几分相似：没有人准许看到中国皇帝。问题是：中国皇帝的鼻子有多长？为了找到答案，你遍访全国人民，问他们认为中国皇帝的鼻子有多长，然后你把不同的长度平均一下。你以为那是非常“准确的”，因为你把那么多人的数据平均了。但是，要发现点儿东西，那不是个法子。你让范围那么广大的人来贡献数据，可他们全都漫不经心，通过求平均数，你是不能知道得更准确一点儿的。

起先，没人指望让我们讨论课本的价格。有人告诉我们，我们可以选多少种书，于是我们就设计了一个工作程序，允许许多补充课本，因为全部的新书都有这样那样的缺陷。最严重的缺陷，在“新数学”课本里：没有应用题，用文字表述的问题，不够多。连卖邮票的事儿也不谈，换算和抽象的东西倒说得太多，却没把这些东西转化为现实世界里

的实际应用。你干的是什么：加、减、乘还是除？因此，我们建议把确有一些实际应用的书当作补充课本——每个班有一两种——作为学生课本的一个补充。花费了许多讨论时间，我们把一切都搞得平衡妥帖了。

等我们把推荐意见交给教委的时候，他们告诉我们，钱没有他们预期的那么多，因此我们不得不返工重来，砍掉这个，砍掉那个，现在要把费用考虑进来，原先那个四平八稳的方案就给毁了，在毁了的那个方案中，教师有机会找到他们需要的东西的一些实例。

既然他们改变了我们可以推荐多少书的老规矩，我们就不可能把事情搞得平衡了，这是个相当稀松的方案。等参议院拨款委员会得到这个方案的时候，这个方案还在挨砍呢。现在，它可真是稀松了！在讨论这个问题的时候，有人让我去见州参议员，但我拒绝了：到那个时候，为这事儿争来争去的，我也累了。我们把提交给教委的推荐报告都预备好了，我也认为把这个推荐报告提交给州里，是他们的工作——这在法律上是没问题的，但在政治上不那么稳妥。我不该这么快就放弃，但是，为了那些书，花了那么大力气，费了那么多口舌，才搞出了那么一个相当平衡的方案，然后呢，把它从根儿上捣毁——这可不提情绪！这整个过程全是无用功，你本来应该反过来，从另一头儿做起：从课本费用为起点，你有多少钱，就买什么书。

第二年，我们要讨论科学课本，这事儿最后让我斩钉截铁，不干了。我以为科学课本或许不同，因此我就看了几本。

同样的事儿又发生了：事情乍看起来还不错，接着就让你恶心透顶。比方说，有一本书，开始是四张图片：第一张是个弹簧驱动的玩具；第二张是一辆汽车；第三张是一个骑自行车的男孩子；接着是别的什么东西。每张图片下面说，“什么让它动？”

我想：“我知道这是个什么用意：他们要谈机械，玩具里的弹簧是怎么工作的；要谈化学，汽车发动机是怎么工作的；要谈生物学，肌肉是怎么工作的。”

这种事情，我爸爸谈过：“什么让它动？一切运动，是因为太阳在照射。”我们接着讨论这事儿，就很有意思了：

“不对啊，玩具动，是因为里面的弹簧上紧了。”我说。

“弹簧是怎么上紧的？”他问。

“我把它扭紧了。”

“那么你怎么会动呢？”

“我吃饭有劲儿啊。”

“庄稼生长，仅仅是因为太阳在照射。因此，因为太阳在照射，所有这些东西都在动。”那样我就得到了一个概念：运动仅仅是太阳能的转化。

我翻过这一页。关于那个玩具，答案是：“能量让它动。”关于那个骑自行车的男孩儿，“能量让它动。”关于任何事儿，“能量让它动。”

那毫无意思啊。假定你不说“能量”，你说“老毛猴子”。那样的话，那个普遍原则就是：“老毛猴子让它动。”这里面出不来什么知识。孩子理解不了任何东西。那不过是个词儿嘛！

他们应该做的，是看着这个玩具，看清楚它里面有弹簧，了解弹簧是什么东西，了解轮子是什么东西，别把“能量”当回事儿。过后呢，等着孩子们理解了这玩具实际上是怎么工作的时候，他们才能讨论关于能量的更普遍的原理。

再说，“能量让它动。”这也不对，因为等玩具停的时候，你也同样可以说，“能量让它停。”他们谈的那件事儿，是浓缩起来的能量，正在转化为稀释了的形式，这是关于能量的一个非常微妙的方面。在这些例子里，能量，既不增加，也不减少；它只是从一种形式变为另一种形式罢了。当东西停下来的时候，能量变成了热，变成了一般的无序状态。

但是，所有的课本都是那个写法：说的那些事儿，没用、混乱、含混、迷惑，以及部分地不正确。谁能从这种书里学到科学，鄙人不知，因为那不是科学。

因此，我看到这些令人作呕的课本，毛病和那些数学课本一样，这时我就看到我的火山形成过程又开始发动了。读那一堆数学课本，使我精疲力竭；全部努力付诸东流，使我情绪低落。再这么折腾一年，我闻之色变，我得辞职。过了一阵子，我听说，那本“能量让它动”的课本，即将被推荐给教委的课程编制委员会，于是我就做了最后一个努力。委员会的每次会议，都允许公众发表评论，于是我就站起来，说我为什么认为那本书坏。

那个在委员会取代了我的主儿说，“什么什么飞机公司的65位工程师，都认可了那本书。”

我不怀疑那个公司有一些相当不错的工程师，但采纳65个工程师的意见，就是采纳大范围的能力——这必然要把一些相当可怜的家伙的能力也笼络在内！这又是那个求中国皇帝的鼻子平均有多长的问题，又是那个给那本无字之书打分的问题。先让那个公司来决定谁是比较好的工程师，然后让这些比较好的工程师来检阅这个课本，那就会好得多。我不敢自称我比65个家伙更聪明——但我比65个家伙的平均数更聪明，却是肯定无疑的！

我没办法把这个道理给他们讲明白，委员会认可了那个课本。

在我还在委员会里面的时候，我不得不去了几趟旧金山开了几次会，等我第一次出差回到洛杉矶的时候，我在委员会办公室停了一下，报销我的费用。

“花销是多少，费曼先生？”

“那个，我坐飞机到旧金山，因此那就是机票，再加上我在离开以后把汽车留在机场那儿的停车费。”

“您带着机票？”

我碰巧带着机票。

“您有停车场的发票吗？”

“没有，但我把车停在那儿，花了2.45美元。”

“可我们必须得要发票啊。”

“我告诉过你，那花了多少钱。如果你们信不过我，那么，关于那些课本，为什么还要让我来告诉你们什么叫好、什么叫坏呢？”

这事儿焖炖了不少时间。不幸的是，我以往都是为公司、大学或者普通人上课。我习惯于这么一种搞法：“您花销多少？”——“这么这么多。”——“这是您的钱，费曼先生。”

于是我决定：不管什么事儿，我是不打算给他们发票的。

第二次出差到旧金山之后，他们又要机票和发票。

“我什么票也没有。”

“这可不行啊，费曼先生。”

“在我接受为本委员会工作的时候，有人告诉我，你会为我支付开支。”

“但我们期望得到发票来证明开支啊。”

“我没什么东西来证明开支，但是你知道我住在洛杉矶，你知道我到了这些别的城市。你以为我究竟是怎么到了那些地方的？”

他们不肯通融，我也是。我觉得，当你身处此境的时候，你要真的跟这个“制度”较起真儿来，那你就必须愿意吃不了兜着走。因此，我心甘情愿，但我的出差费用始终没报销。

这是我玩儿的一种游戏。他们要发票？我偏不给他们发票。那么你

就别要钱。那好，不要钱就不要钱。他们信不过我？见他的鬼去。他们用不着给我报销。当然，这事儿荒唐！那是政府的工作方式，这我知道；那好，操他个政府！我认为，人应该把人当人来对待。除非我能得到人的待遇，否则我就不想和他们有来往！他们感觉不良？他们感觉不良。我也感觉不良。该怎么办就怎么办吧。我知道他们在“保护纳税人的利益”，但是，在下面这件事儿中，你看看，纳税人得到了什么样的保护。

在进行了很多讨论之后，有两本书，我们形成不了决定，这两本书极其相似。所以，我们就把这事儿留给教委裁决。因为委员会现在开始考虑费用了，又因为那两本书半斤对八两，委员会就决定招标，取价低的。

问题接着就来了，“学校是在正常时间得到书，还是或许在新学期之前早一点儿得到书？”

一个出版社的代表站起来说：“我们很高兴你们接受了我们的投标，我们能够在下学期把书提前送去。”

那个输了标的出版社的代表，也在那儿，他站起来说，“因为我们的标是根据较晚的期限投的，我认为，我们应该有按照较早期限重新竞标的机会，因为我们也可能早一点出书。”

诺瑞斯先生，在委员会里的帕萨迪纳的律师，问后面那个出版社的家伙：“你早一点儿出书，我们要出多少钱？”

那家伙出了个价：便宜了一点儿。

头一个家伙站起来：“如果他改变他的投标，我也有权力改变我的投标！”——他出价更低！

诺瑞斯问：“哦，是那样吗？——我们提前得到书，并且更便宜？”

“是的，”一个家伙说，“我们可以用一种特别的印刷方法，我们一般不用的……”——这是在解释为什么会便宜。

另一个家伙随声附和：“你做得越快，费用就越少！”

这可真是骇人听闻。最后是便宜了200万美元啊。这种突然的变化，真让诺瑞斯七窍生烟。

结果事情当然是这样：交货日期不定了，就开了口子让这些家伙重新投标。正常的情况是，当选书不考虑价格的话，那就没有理由降低价格。出版社想定什么价就定什么价。通过压价来竞争，没好处。他们那种竞争方式，是为了给课程编制委员会留下印象。

顺便提一下，只要委员会开会，出版社就招待课程制定委员会的人吃午饭，跟他们谈书的事儿。我从来没去。

事儿在今天看来，是一目了然的，但人在当时，遇到下面这种情况，我不知道那是怎么回事儿：我收到了一包干果，或者“西联公司”寄来的无论什么东西，里头还附带了一个纸条儿，“从我们家到你们家，感恩节快乐——帕米里奥一家。”

东西是从长滩（Long Beach）72这地方的一家人那里寄来的，但我不认识这家人。显然是有人想寄东西给他朋友一家，可把名字和地址搞错了，因此我想我还是把事情搞清楚的好。我打电话给“西联公司”，得到了那个寄东西的一家人的电话号码，然后给他们打电话。

“喂，我叫费曼。我收到了个包裹……”

“啊，哈喽，费曼先生，我是皮特·帕米里奥（Pete Pamilio）。”他说得亲亲热热，我都认为我应该知道他是谁！我通常就是这么个傻瓜，记不住人。

于是我说，“我很抱歉，帕米里奥先生，我记不大准你是哪位了……”

原来他是一家出版社的代表，我呢，替课程编制委员会评估他们的书。

“我明白了。但这可能会引起误解。”

“只是我们两家子之间的来往嘛。”

“是的，可我眼下正在评估你们出的书，或许有人会胡乱解释你的好意！”我已经知道那是什么事儿了，但我故意装疯卖傻。

与此类似的另一件事儿，是一家出版社寄给我一个真皮的公文包，还把我的名字用金字漂漂亮亮地烫在上边。我对他们说了同样的话：“我不能收。我在评估你们出的一些书。我觉得你不了解这事儿！”

有个委员，做的时间最长，说：“我从来没收东西，那让我心神不宁。可一直有人送东西。”

但我真的错过一次机会。假如我脑子转得快，那我在那个委员会里的时候，真可以花天酒地。我晚上住在旧金山一家旅馆，等第二天好参加我的第一次会议，我想在城里溜达溜达，吃点儿东西。我从电梯里出来，坐在旅馆大厅里的两个家伙，跳将起来，说：“晚上好，费曼先生。您这是上哪儿去啊？洛杉矶这地方，有没有什么东西，我们带您去瞧瞧？”他们是一家出版公司的人，我不想和他们掺和事儿。

“我出去吃点儿饭。”

“我们可以带您去用晚餐。”

“别，我想一个人。”

“呃，无论您想怎么办，我们都帮得上忙。”

简直盛情难却了，我就说：“那好，我想出去找麻烦。”

“我们认为，那个我们也能帮得上忙。”

“不，我想我可以照顾自己。”我接着就想，“错了！我应该让一切运作起来，记个日记，那样加利福尼亚州里的人，就可以发现出版社办事儿有多过分！”等我发现出入竟然有200万美元的时候，老天爷知道那好处有多大！

诺贝尔的另一个错误

在加拿大，他们有一个很大的物理学学生协会。他们主办会议，他们发表论文，等等。有一次，温哥华分会要我去给他们讲话。主事儿的女孩儿和我的秘书早就筹划好了，不跟我打声招呼，就径直飞到洛杉矶。她就那么大摇大摆地进了我的办公室。她伶俐可爱，一个金发碧眼的妞儿。（这有作用的。不该这样，但这就是有作用。）这事儿的经费全是温哥华的学生出的，这给我留下了印象。在温哥华他们对我太好了，现在我知道了怎么接受人家的招待、怎么讲话的秘密了：等学生来请你。

有一次，我获得诺贝尔奖之后的第几年，加利福尼亚大学欧文分校学生物理俱乐部的几个孩子，到我这儿来，想让我去讲话。我说：“我喜欢去干这个事儿。我想做的，是只想跟物理学俱乐部的人说话。但——不客气地说——我从经验中得知，有麻烦的。”

我告诉他们，以前每年我都到当地的一个高中去跟物理学俱乐部讲相对论，或者讲任何他们让我讲的东西。接着，等我得了诺贝尔奖之后，我还去那儿，跟以前一样，没做准备，他们呢，把我树在三百个孩子面前。

那可叫一个乱啊。

这种让我害怕的事儿，大约有三四次，我成了个白痴，一时不知道怎么办了。那次我应邀到伯克利大学去讲物理学的什么东西，我准备了一些非常专业的东西，指望像往常那样讲给物理系的人听。可等我到了那儿，这个巨大的大教室，人满为患！我知道，在伯克利大学，能明白我准备的这个水平的东西，人数没这么多。我的麻烦是，我喜欢取悦于

来听我说话的这些人，如果每个人连他的哥哥都来听我说话，我取悦不了他们了：我就不了解我的听众了。

等这些学生理解了我不容易到个地方给物理俱乐部讲话之后，我说："让我们杜撰一个听起来傻头傻脑的题目，再杜撰一个听起来傻头傻脑的教授的名字，那样的话，就只有真对物理学感兴趣的孩子们会不怕麻烦来听讲，那才是我们要的人，好不好？你们不必满世界张扬。"

有几张海报出现在欧文分校的校园里：来自华盛顿大学的亨利·沃伦教授，将于5月17日3点在D102室宣讲质子的结构。

然后，我就来了，说："沃伦教授有点儿私人的麻烦事儿，今天不能来给诸位讲话了。他就打电话给我，能不能来给你们讲讲这个题目，因为我一直就在这个领域里做研究。因此呢，我就来了。"这办法，高。

但是后来，也不知怎么搞的，俱乐部的指导老师发现了这个诡计，对学生们好一个生气。他说："你们知道，如果大家知道费曼教授要下来，许多人都会来听他讲话的。"

学生们解释说，"就是因为这个嘛！"可这位指导老师气急败坏了，因为炮制这个玩笑，竟然没有他的份儿。

听到学生们真有麻烦了，我决定给那个指导老师写封信，说明白那都是我的错儿，说除非这么安排，我就不去讲话，说我已经告诉学生不要告诉任何人。我非常抱歉，请原谅我，啰里啰唆，啰里啰唆……因为那个鬼奖金，我不得不搞这一套！

就在去年，阿拉斯加大学费尔班克斯分校的学生请我去讲话，这次很好，除了当地电视台的采访之外。我不需要采访，采访没意义。我是来给学物理的学生讲话的，就这么回事儿。如果满城的人都想知道那个，那就让学校的报纸告诉他们得了。正是因为诺贝尔奖，我才不得不接受采访——我是个大腕儿，对吧？

我的一个朋友，有钱——他发明了一种简单的数字开关——给我讲了一些捐钱设奖或设讲座的人的事儿："对他们，你要时时留心，看看他们做过什么见不得人的事儿，需要用这个来安慰良心。"

我的朋友马特·桑德斯（Matt Sands）一度想写一本书，叫《艾尔弗雷德·诺贝尔的另一个错误》。

许多年，到诺贝尔奖奖金快颁发的时候，我也会看看是谁得了奖。但过了一阵子，我连诺贝尔"季节"是什么时候，都想不起来了。因此，为什么有人在凌晨三点半或者四点给我打电话，我是一点都不明白了。"费曼教授？"

"嗨！凌晨这个点儿，你给我打的哪门子电话？"

“我原以为您愿意知道您已经获得了诺贝尔奖。”

“是的，但我在睡觉！要是你在上午给我打电话，就好了。”——我把电话挂了。

我妻子说：“什么事儿啊？”

“他们告诉我，我得了诺贝尔奖。”

“哦，费曼，是谁？”我经常说话没正经，她也聪明得很，从来不上当，但这次，我逮着她了。

电话又响了：“费曼教授，您听到……”

（无可奈何的声音）“听到。”

然后我开始想：“我怎么能就此打住？我一点儿也不想要这个！”因此，头一件事儿，是把电话从叉簧上拿下来，因为电话一个接一个地打来。我想再去睡觉，但我发现睡不成了。

我下楼到书房去想这事儿。我怎么办？或许我不要接受这个奖。那会出什么事儿？或许那做不到的。

我把电话放回去，电话立刻响起。那是《时代》周刊的一个家伙。我对他说，“听着，我有了个麻烦，因此你别记录我下面的话。我不知道怎么摆脱这个事儿。有办法不接受这个奖吗？”

他说：“您恐怕拿这事儿没办法，先生，您不如将就着得了，免得弄出更多无谓的乱事儿。”事儿明白了。我们谈了不少，15到20分钟的样子，《时代》周刊的这个家伙从来也没发表这次谈话的任何东西。

我对《时代》周刊的这个家伙说，非常感谢你，就挂了电话。电话立即响了：报社打来的。

“是的，您可以到报社来。是的，好的。对，对，对……”

其中一个电话，是瑞典领事馆的一个家伙打的。他将要到洛杉矶举行个招待会。我琢磨着，因为我决定接受这个奖，我就必须得忍受这些事儿了。

这位领事说：“拟一个名单，是您想请的人，我们也拟一个名单，是我们想请的人。然后呢，我会到您办公室，我们比较一下两个名单，看有没有重复的，然后我们就写请柬……”

我就写了我的名单。大约八个人——我的街坊，我的艺术家朋友左提安，等等。

领事拿着他的名单到了我办公室：加利福尼亚州长，这个大员，那个大腕儿，石油大王格蒂[73]，某个女演员——有三百人啊！不需要说，怎么也不可能有重复现象！

我就有点儿不安了。跟这么多达官贵人见面，这主意，吓坏我了。

领事看出我忧心忡忡。“啊，别担心，”他说，“大多数人不来。”

那可好了，我不曾安排个聚会，邀请人家来，又明明知道人家不来！我不必向任何人磕头颠蒜，给他们那种可以拒绝的邀请，让他们有沾沾自喜的机会。这很蠢嘛！等我回家的时候，我真的为这整个的事儿，坐立不安了。我给领事打回电话，说：“我仔细想过，我意识到我没办法去应付这个招待会。”他乐了。他说：“您太对了。”我以为他也跟我一样——为这个抽风的事儿，不得不搞这么个聚会，那还不跟犯了痔疮似的难受。事儿到最后，皆大欢喜。没人想来，连贵客也不来！主人也乐得轻松！

在那一段时间，我总有某种心理上的困难。你知道，我是我那位一贯睥睨王室和排场的父亲养大成人的（他干的是制服的买卖，因此他知道一个穿上制服的人和一个脱了制服的人之间的区别——是同一个人）。我实际上是学会了一辈子挖苦这类事儿，这种脾性如此强烈，深入骨髓，不带着点勉强，我都走不到一个国王的跟前去。这很孩子气，我知道，但我就是那么个教养，所以这是个问题。

人家告诉我，瑞典那儿有个规矩，在你接受了这个奖之后，你得倒退着离开国王，不可转身。你走下若干级台阶，受了奖，然后走回台阶上面。因此，我对自己说，“那好，等我去修理他们！”——我练习起了跳着上台阶，倒退着跳，表明他们的习俗有多么可笑。我这情绪太可怕了！那既蠢且傻，当然是。我发现那不再是个规矩了，你可以转身离开国王，你像个正常人类那样走路，朝你打算去的那个方向，把鼻子摆到前头。

我高兴地发现，并非全部的瑞典人，都像你认为的那样，把王室典礼当回事儿。等你到了那儿，你发现他们站在你这边儿。比方说，学生们为每一个诺贝尔奖得主举行特别的“青蛙授勋”典礼。在你得到这个小青蛙的时候，你必须学青蛙叫。

我在年轻的时候，反文化，但我父亲有些好书。有一本书，里头有古希腊的剧本《青蛙》，有一次，我在这个剧里瞥见了青蛙的叫声，字儿是这么写的：“brek, kek, kek”。我想，“没什么青蛙弄出那种动静。那样来描写青蛙叫声，是发疯！”于是我就自己试着那样叫，在练习了一阵子之后，我发现那确确实实就是青蛙的叫声。

因此，我偶尔一瞥阿里斯托芬的书，到后来证明是有用的：在学生的诺贝尔奖得主的典礼上。我学青蛙叫学得很出色！倒退着跳，也派上了用处。因此，我喜欢典礼的这一部分。那个典礼进行得很好。

在得到了许多乐子的同时，我自始至终确实仍然有这种心理上的困难。我最大的麻烦，是在国王晚宴上你不得不发表的“感谢您”演讲。当他们给你那个奖的时候，他们也给你几本装帧得很漂亮的书，写的是前些年的事儿，你得到了以前写的全部的“感谢您”演讲，好像那是什么了不得的事儿似的。因此，你就开始认为你在这种“感谢您”演讲中说的话，是具有某种重要性的，因为它是要出版的呀。我没有意识到的，是难得有什么人会仔细听这种演讲，而且没有什么人会去读它！我已经方寸大乱：我不可能说个非常感谢你就拉倒啊，咭里呱啦，咭里呱啦；说个感谢的话，不是很容易嘛，但不容易啊，我说话得实在。可事实是，我真的不想要这个奖，因此，当我不想要的时候，这谢谢你，我怎么说得出口啊？

我妻子说，我是个神经过敏的废物，竟然为演讲里说什么话慌里慌张，但我最后琢磨出了一个办法，来搞出一个听起来完全令人满意却又是完全诚实的演讲。那些听过这个演讲的人，可一点儿也不知道，这家伙在准备它的时候，都受了什么苦。

我开始的时候，是这么说的：在发现了我所做的事情时的那种欢乐当中，在别人运用我的研究工作这一事实当中，在什么什么当中，我已经得到了我的奖赏。我尽力解释了我已经得到了我期望得到的一切，与此相比，别的都无关紧要。我已经得到了我的奖赏。

但是，我接着说，突然之间，我收到了一大堆信——在演讲里，这个事儿说得比较好——这让我想起了我认识的所有的人：那些信，有的来自童年玩伴儿，当他们读早报的时候，跳了起来，叫着：“我认识他！他就是那个和我们一块儿玩儿的小孩儿！”等等。像那样的信，特别鼓舞人心，表达的是我理解为某种爱的东西。为了那个，我感谢他们。

演讲进行得顺利，但和王室打交道，我总是觉得有点儿难。在国王晚宴上，我挨着一个公主坐着，她在美国上过大学。我想当然地认为，她跟我的态度一样，但我想错了。我认为她只是个孩子，跟别人一样。我评论国王和王室全家不得不忍受这么长时间，在吃饭之前还得跟招待会上的全部客人握手。“在美国，”我说，“我们能把这事儿搞得更有效率。我们会设计一个握手的机器。”

“是的，但在此地，这机器或许不会有太大的市场，”她不甚自在地说，“皇室的人没那么多。”

“恰恰相反，市场会是很大的。首先，只有国王有这样的机器，我们会为他免费提供。接着呢，当然，别人也想要一个机器。现在，这问题变成这样：谁能被允许拥有一台机器？总理得到许可，可以买一台；然后参议院议长得到许可，可以买一台，然后是最重要的老资格议员。因此，一个很大的、不断扩展着的市场，是存在的，而且很快，你也不必去和一长串等着召见的机器握手了。你把你的机器派去就成！”

我也坐在那位负责组织这个晚宴的夫人旁边。一个女服务员过来，往我的酒杯里倒酒，我说：“不，谢谢你，我不喝。”

这位夫人说，“不，不。让她斟酒。”

“可我不喝的啊。”

她说：“没关系。您看，她有两个瓶子。我们知道八十八号不饮酒。”（八十八号在我的椅子背上。）“看起来完全一样，但有一种不含酒精。”

“但你是怎么知道的？”我叫起来。

她微微一笑。“现在看看皇上，”她说，“他也不饮酒。”

她告诉了我一些他们在特别的一年遇到的麻烦事儿。其中有一件，是俄国大使该坐哪儿？像在这样的宴会上，麻烦总是谁坐得离国王近些。诺贝尔奖得主，通常比外交使团，坐得离国王近些。外交官的座次，决定于他们在瑞典任职的时间长短。在当时，美国大使比俄国大使在瑞典待得时间长。但在那一年，诺贝尔文学奖得主，是肖洛霍夫[74]先生，一个俄国人，而俄国大使想为肖洛霍夫先生当翻译——因此就坐在他旁边，因此，问题是如何让俄国大使坐得离国王近些，又不至于得罪美国大使以及其他外交使团。

她说：“在我得到许可把这位大使安排坐在肖洛霍夫先生旁边之前，您可不知道他们这一通闹腾——信件来往如梭，电话铃声不断，等等等等。最后，大家同意，那位大使，在那天晚上，将不是苏联大使馆的官方代表，他倒成了肖洛霍夫先生唯一的翻译。”

晚宴之后，我们离座到了另外一个房间，大家在里面三五成群地谈着。有一个丹麦什么公主，不少人和她围坐一张桌子，我看到他们这桌子有一张空椅子，就坐了下去。

她转头朝向我说，“哦！您是诺贝尔奖得主之一。您在什么领域工作？”

“物理。”我说。

“噢。呃，没人知道那个，因此我猜我们没法子谈那个。”

“恰恰相反，”我回答，“正是因为有人还知道点儿物理，我们才没法子谈物理。没人知道的那种事儿，我们才可以讨论。我们可以谈天气，我们可以谈谈社会问题，我们可以谈谈心理学，我们可以谈谈国际金融——可是黄金买卖，我们谈不得，因为这个事儿，人人都明白——因此，没有人知道任何东西的那种题目，才是我们可以谈的！”

我不知道那些人是怎么办到的。有一种方法，是在脸的表面上结冰，她就能够做到一脸冷霜！她转过脸，跟别人谈去了。

过了一阵子，我看得出来，我完全从谈话中给割了出去，于是我就站起来，要走开。日本大使，也坐在这桌子旁，跳起来，跟着我。“费曼教授，”他说，“我愿意告诉您一点儿外交上的事儿。”

他讲了一个好长的故事，说的是一个日本的年轻人，去上大学，研究国际关系，因为他以为自己能够为他的国家做出贡献。作为一个大二的学生，他开始对自己所学的东西，有一种由怀疑带来的隐痛。大学毕业后，他在一个大使馆得到了他的第一个职位，直到他意识到，没有人懂得国际关系的任何事儿。到了这份儿上，他就能够做大使了！“因此，费曼先生，”他说，“下次您再举例说明那些人人都在谈没人知道的事情的时候，请把国际关系包括进去！”

他这人很有意思，我们就谈开了。我一直对不同的国家和不同的人民，何以会有不同的发展这一问题感兴趣。我告诉这位大使，有一件事，在我看来，一直是值得注意的现象：日本是如何把自己迅速发展为一个在世界上如此现代而重要的国家的。“日本人民的什么方面和性格，才使日本有可能办成此事？”我问。

日本大使回答的方式，我喜欢听：“我不知道，”他说，“我倒可以假定某种原因，但我不知道是不是对。日本人相信他们只有一条前进的道路：让他们的孩子比自己受到更多的教育；使他们抛撇农夫的境地，而成为有教养的人，教育是很重要的。因此，在家庭里，大家下了大力气，来鼓励孩子们在学校里学习好，有出息。因为这种不断学习的趋势，外来思想可以非常容易地播撒到整个教育体系之中。或许那就是日本为什么发展得如此迅速的原因。”

总而言之，我必须说，瑞典之行最终是令人愉快的。我没有立刻回家，却去了在瑞士的“欧洲粒子物理研究所”（CERN），去讲话。我出现在我的同事们面前的时候，穿的是那身出席国王晚宴时穿的西服——我以前从来没有穿着西服讲话。我是这么开讲的，“事儿很可笑，你们都知道。在瑞典，我们坐在那儿讨论，得了诺贝尔奖之后，会不会有什么变化，实际上，我已经看到了一个变化：我还挺喜欢这身西服。”

人人都说“啊呸！”维斯科普夫（Weisskopf）跳起来，甩掉他的外套说，“在讲座上，别穿西服了！”

我把我的外套脱了，松了松领带，说：“我在瑞典过了这一阵子之后，我开始喜欢这玩意儿了。可是，现在，我回到了世上，一切事情又都顺了。谢谢各位把我弄妥帖了！”他们不想让我变。因此事儿搞得很快：在CERN，他们把我在瑞典经历的事儿都消除一空了。

我得了钱，这不错——我买得起一所在海边儿的房子——但总起来说，我认为，不得奖金，好得多——因为你再也不可能在公共场合率性

而发了。

从某种意义上说，诺贝尔奖奖金，从来都是一件恼人之事，尽管我起码有一段时间为此洋洋自得。我获得诺贝尔奖之后不久，格温妮丝和我收到了巴西政府的邀请，作为荣誉贵宾，参加里约的狂欢节庆典。我们欣然接受，玩儿得很开心。我们跳舞跳得不亦乐乎，看桑巴学校在盛大的游行中，演奏他们那种奇妙的节奏和音乐。报纸和杂志的摄影师不停地拍照片——“看呀，美国来的教授和巴西小姐跳舞呐。”

身为“名流”，是一乐子啊，但把我们当名流，显然是错了。那一年，没人对荣誉贵宾大惊小怪的。我后来才发现，给我们的邀请是怎么弄出来的。本该当荣誉贵宾的，是吉娜·罗洛布丽吉达（Gina Lollo-brigida）75，可就在狂欢节之前，她说不。负责组织狂欢节的旅游部长，在“物理研究中心”有些朋友，他们知道我以前在桑巴乐队里玩儿过，又因为我最近得了诺贝尔奖，这个事儿新闻上就有。在部长六神无主之间，他的朋友们就出了个馊主意：用物理学教授，代替吉娜·罗洛布丽吉达！

不用说，这位部长把狂欢节的工作搞得这么糟糕，后来丢了“乌纱帽”。

把文化带给物理学家

尼娜·拜尔（Nina Byers），加利福尼亚大学洛杉矶分校的一个教授，在20世纪70年代早期的一个时候，负责起物理讲座的事情。讲座通常是这么一个地方，从别的大学来的物理学家，到这儿来谈纯专业的东西。部分地是由于那年代特有的气氛，她认为物理学家需要更多的文化，因此她就想安排一些文化的东西：因为洛杉矶离墨西哥近，她就想搞一个讲座，要讲玛雅人的数学和天文学。玛雅是墨西哥的古老文明。

（得记住我对文化的态度：那种事情，要是在我的大学里，会把我逼疯！）

她开始物色一个教授来讲这个题目，可在加利福尼亚大学洛杉矶分校，她找不到一个堪为专家的人。她给好几个地方打电话，还是找不到什么人。

然后她记起了奥托·纽治保尔（Otto Neugebau-er）教授，他是布朗大学的，巴比伦数学方面的大家。76她给在罗得岛的他打电话，问他知不知道西海岸这儿有没有什么人，能讲讲玛雅人的数学和天文学。

“有的，”他说，“我知道有。他不是个专业的人类学家或者历史学家，他是个业余的。但他肯定知道得不少。他名字叫理查德·费曼。”

她几乎要死过去！她努力要为物理学家们带来点儿文化，而唯一的

办法，却是让一个物理学家来办这事儿！

我知道点儿玛雅数学，原因是在我和我的第二个妻子玛丽·娄在墨西哥度蜜月的时候，我精疲力竭了。她对艺术史，特别是墨西哥的艺术史，兴趣极大。于是，我们就到墨西哥度蜜月，在金字塔上爬上爬下。她到哪儿去，都让我陪着。她让我看许多有意思的东西，比方说，各种各样的形象设计之间的关系，但在炎热潮湿的丛林中这么爬上爬下了几天（和几晚上）之后，我精疲力竭了。

在危地马拉不知什么地方的一个小镇子里，我们走进了一个博物馆，里面展柜里有一份满是奇怪符号、图画和杠杠、点点的手稿。那是一份复制品（一个叫维拉科特（Villacorta）的人制作的），原本是德累斯顿古本，在德累斯顿的一家博物馆里发现的一份玛雅人写的书。我小的时候，我爸爸曾经带我去看纽约世界博览会，在那儿他们复制了一个玛雅神庙。我记得他告诉我，玛雅人发明了“零”这个数，还做了许多有意思的事儿。

那个博物馆卖这个古本的复制品，我买了一份。在每一页书上，左边是古本拷贝，右边是介绍，以及部分的西班牙语译文。

我喜欢解难题和解密码，因此在看到那些杠杠和点点的时候，我想：“我这可有的玩儿了！”我用一页黄纸遮住西班牙语译文，开始坐在旅馆房间里，玩儿这种破译玛雅杠杠和点点的游戏，我妻子却整天在金字塔上爬上爬下。

我很快琢磨出，一个杠等于五个点，表示零的，又是什么符号，等等。又过了不多一会儿，我琢磨出那些杠杠和点点，在第一次总是到二十就进位，可到第二次，逢十八进位（造成360的循环）。我还搞清楚了和各种各样的面具有关系的一些事儿：它们确实代表某些日子和星期。

我们回家之后，我继续搞这个东西。试着破译那种东西，整个太好玩儿了，因为你开始的时候，什么也不知道——你没有从哪儿开始的线索。但是，你接着就注意到某些数经常出现，这些数又加在别的数上，等等。

在古本上有个地方，584这个数非常显眼。584这个数被分为236、90、250和8这几个段。另外一个显眼的数是2920，或者584×5（365×8也是一样）。还有一个乘法表，是2920的倍数，一直到13×2920，接下来有一阵子是许多13×2920的倍数，然后——是一些滑稽的数！我当时以为那些数是错了。只是在许多年后，我才琢磨出那些滑稽数是怎么回事儿。

因为表示日子的一些数字和584是有关系的，可584又分为这么奇怪的另外几个数字，我就想，如果那不是某种神秘的周期之类的东西的话，那或许是天文学上的什么东西。最后，我去图书馆查了天文学的

书，我发现，从地球上看，583.92天是金星的周期。那么，236、90、250和8就明显起来：那一定是金星经过的几个相位。它在早晨出现的时候，我们看不见它（它在太阳的那一边）；然后，它又在晚上出现，最后又消失了（它在地球和太阳之间）。90和8之所以不同，是因为与金星走到地球和太阳之间的时候相比，当它在太阳那一边的时候，它在天上运行得比较慢些。239和250之差，或许表示玛雅土地东方和西方地平线之间的差别。

我还发现了另外一个表，上面的周期是11959天。这原来是一个预测日食的表。还有一个表，上面有降序排列的91的一些倍数。我从来没能把这个表弄明白（别人也没弄明白）。

等我把我能搞明白的都搞明白了之后，我最后决定看看那些西班牙语的注解，看看我搞明白了多少。西班牙语的注解完全是胡说八道。这个符号是土星，那个符号是神——简直是狗屁不通。因此，我也用不着把注解遮着盖着了，反正我从那里头什么东西也学不到。

此后，我开始读了不少关于玛雅人的东西，发现研究这东西的大腕儿是埃里克·汤普逊（Eric Thompson），我至今还保存着他的几本书。

等尼娜·拜尔给我打电话的时候，我才发现我已经把德累斯顿古本的复制品弄丢了。[我把它借给了罗伯逊（H.E.Robertson）夫人，她在巴黎的一个古董商的一个旧箱子里发现了一本玛雅古本。她把这东西带到了帕萨迪纳给我看——我仍然记得我开车回家的时候，把这东西放在汽车前座上，心里想："我可得小心驾驶：我得到了一个新古本。"——但是，等我一仔细看这东西的时候，我一眼就看出它完全是个冒牌货。我稍做研究，就发现这个新古本的每一幅图，都是从德累斯顿古本那里扒来的。于是，我就把我的书借给她，让她看看什么叫真货，我最后把书忘在她那儿了。]因此，加利福尼亚大学洛杉矶分校的图书馆员，费了好大劲，才找到了一份维拉科特制作的德累斯顿古本的复制品，把它借给了我。

我又重新把计算搞了一遍，实际上我比上次又有了一点发现：我琢磨出那些"滑稽的数"，实际上是接近于正确周期（583.923）的什么数的整数倍，而我以前以为那些数是错误的——玛雅人已经意识到584不怎么对劲儿！77

加利福尼亚大学洛杉矶分校讲座之后，拜尔教授送给我一些彩色的德累斯顿古本的复制品。几个月后，加州工学院希望我给帕萨迪纳的公众上同样的课。罗伯特·罗文（Robert Rowan），一个房地产商，借给了我一些非常有价值的玛雅神石刻像和陶俑，好在加州工学院上课用。把那种东西带出墨西哥，多半是非常违法的。那些东西价值太大，我们雇了保镖善加保护。

在加州工学院讲课的前几天，《纽约时报》大肆炒作，报道说，一

个新古本已经被发现。当时，已知存世的古本只有三份（其余两个，很难弄明白）——成千上万的古本，都被西班牙牧师当作“魔鬼之书”付之一炬。我有个堂姐妹在美联社工作，为我搞到了一张《纽约时报》发表的新古本的一张照片，我把它做成幻灯片，也用在我的讲座中。

这个新古本，是个冒牌货。我在讲座中指出，其中的数字，在书法风格上，类似于马德里古本，但确实是236、90、250和8——这也巧合得离奇了！在成千上万的原书当中，我们又得到了另外一个片断，上面的东西却跟原来那个片断上的东西一模一样！很明显，又是那样，拼凑起来的破玩意儿，没有一点儿真东西。

那些制造赝品的家伙，从来没有胆量捏造某种真正不同的东西。如果你发现了某种确实是新的东西，它必须得有点儿不同的东西。真能骗人的东西，应该打火星周期这种东西的主意，炮制一个神话，与之相辅相成，然后再画些和这个神话有关的图案，图案上有些正对火星合适的数字——不能搞得太明显。最好是弄一些周期倍数表，其中还得有一些神秘的“错误”，等等。数字需要花点儿力气才能搞出来。这样，大家就会说：“嚯！这玩意儿和火星有关系！”除此之外，里头还得有不少东西，没办法理解，跟以前看到的东西不完全一样。那样才能制造一个好的冒牌货。

我从“破解玛雅象形文字”的讲座中，得到好大的快乐。我又一次越俎代庖。大家鱼贯而入讲座大厅的时候，顺便浏览三个玻璃展柜，穿制服的武装保安看着呢，大家对德累斯顿古本彩色复制品和真正的玛雅古物啧啧称奇。他们听这个领域的一个业余爱好者讲玛雅人的数学和天文学，一听就听了两个小时（这个家伙甚至告诉他们怎么甄别伪造的古本），听完了，他们出去了，又欣赏玻璃展柜。接下来的几个星期，默里·盖尔曼讲了六次系列讲座，讲的是世界上所有语言之间的语言学关系，讲得天花乱坠。

巴黎见分晓

我讲了一个物理学的系列讲座，艾迪生韦斯利出版公司（Addison Wesley Company）把它搞成了一本书。有一次，吃午饭的时候，我们讨论书的封面应该弄成个什么样子。我认为，因为那个讲座是真实世界和数学之间的联系，那么弄一个鼓的图画儿，在鼓的上面再弄一些数学图形——圆圈儿、直线什么的，表示从震动的鼓膜上飞出的鼓点儿，书里讨论过鼓点儿，这或许是个好主意。

书出来的时候，封面是简单的红色，但不知什么原因，在前言那儿，有一幅我打鼓的照片。我认为，他们把那照片放那儿，是为了满足他们的一个想头：“作者本人希望书里什么地方有面鼓嘛。”无论如何，人人都会迷惑不解：为什么那幅我打鼓的照片出现在“费曼讲座”的前言里，因为这照片里没有什么数学图形，也没有别的点题的东西。（我喜

欢打鼓，这不假，但那是另一档子事儿。）

在洛斯阿拉莫斯，工作压力很大，没什么法子自我娱乐，没电影什么的。但我在那个以前是男子中学的地方，发现了几个鼓，于是善而藏之。洛斯阿拉莫斯在新墨西哥州的中部，那儿有许多印第安人的村子。因此，我就自己找乐子——有的时候是我一个人，有的时候和别的家伙——只是想闹点儿动静出来，打那些鼓。我不知道什么特别的节奏，但是印第安人的鼓点儿相当简单，鼓也不错，我玩儿得挺高兴。

有的时候，我带着几个鼓，到远处的树林里，免得烦扰别人，我就用一根儿棍子，且打且唱。我记得，有个晚上，绕着一棵树转圈儿，一边儿打鼓，一边儿仰望月亮，假装自己是个印第安人。

有一天，一个家伙来对我说："感恩节前后，你没去树林里打鼓，是吧？"

"去了，是我打的。"

"噢！这么说，我老婆说对了！"接着他给我讲了这么个故事：

一天晚上，他听到远处有鼓乐之声，就到了楼上去找另一个家伙，那个家伙也听到了。你该记得，这些家伙都是从西边儿来的。他们对印第安人什么也不知道，可是兴趣不小。印第安人一定在举行什么仪式，或者在做什么高兴的事儿，这两个主儿就决定过去看个究竟。

他们往前走的时候，走得越近，鼓声就越大，他们开始紧张了。他们想起印第安人多半在外围安排了放哨的，免得别人惊扰他们的仪式。于是他们匍匐在地，循迹前往，直到声音显然就在下一个山头的后面。他们爬到山顶，不看不知道，一看吓一跳：只有一个印第安人，自顾自地在那儿举行仪式——绕着树跳舞，还用棍子打鼓，还唱着颂神之歌。两个家伙悄悄地屈身而退，因为他们不想惊动他：他多半是在发某种咒语什么的。

他们把这事儿告诉了他们老婆，他们老婆说："哈，一定是费曼——他喜欢打鼓。"

"别胡扯了！"两个男人说，"即使是费曼，也不会疯到那个份儿上！"

因此下个星期，他们就着手把谁是那个印第安人这事儿弄清楚。附近的印第安保留地的几个印第安人，在洛斯阿拉莫斯工作，于是他们就问一个在技术区当技师的印第安人，那能是谁啊。这个印第安人问了一圈儿，但别的印第安人都不知道那可能是谁，但有个印第安人是例外，没人能跟他讲话。他是个了解自己民族的印第安人：他背后有两条大辫子，头高高地昂起；无论什么时候他走到哪儿，都是高视阔步，器宇轩昂，独自一人；没人可以和他说话。走到他跟前去问点儿事儿，你会害

怕的。他太威严了。他是个炙手可热的人物。没人有胆量去跟这位印第安人打听事儿，他们断定树林子里的那位，必定是他了。（得知他们找到了这么一位典型的印第安人，这么一位魅力十足的印第安人，一位我可能是他的印第安人，我很高兴。被人错认为是他，太光荣了。）

那个问过我的伙计，心有不甘——丈夫总是乐于证明妻子不对——正如丈夫经常发现的那样，他发现他老婆说得相当对啊。

我鼓打得相当好了，有聚会的时候，我就打。我不知道自己在干什么，我只是打出点儿节奏——结果我打鼓打出了名声：在洛斯阿拉莫斯这地方，人人都知道我喜欢打鼓。

等战争结束，我们重返“文明”世界，在洛斯阿拉莫斯那儿的人，跟我逗乐儿说，我再也不会打鼓了，因为鼓的动静也太烦人了。还因为我想在伊萨卡的康奈尔大学那儿当个讲体面的教授，指不定在什么时候，我会把我待在洛斯阿拉莫斯时候买的鼓卖掉。

第二年夏天，我回到了新墨西哥州，去写报告，等我又看到了那些鼓的时候，我就技痒难耐了。我又买了个鼓，心里想：“这次我要把这鼓带回去，只是为了可以看看它。”

到康奈尔大学那年，我的那套小单元房是在一个大楼房里。我把鼓放在那儿，只是为了看看，但是，有一天，我确实忍不住了：我说，“也罢，我只是得小声点儿敲……”

我在一把椅子上坐下，把鼓夹在两腿之间，用手指头轻轻敲击：叭叭叭、叭嘟叭。然后，声音稍微大了一点儿——这也够诱惑我的了！我再大点儿声音，梆！——电话响了。

“哈喽？”

“我是你的房东啊。是你在下面打鼓吗？”

“是，非常对不……”

“这也太好听了啊。我能下去凑近点儿听听吗？”

从那次以后，我一打鼓，我的女房东就下楼来听。这样就无所顾忌了。从此以后，我有的玩儿了，打鼓。

大约是在那个时候，我认识了一个从比属刚果来的女士，她给了我几张为做人种学研究用的唱片。在那年头儿，那种唱片稀奇，上头是非洲牧牛人和其他部落的鼓乐。我真的非常非常佩服牧牛人鼓手，我也经常模仿他们——模仿得不十分像，但听起来像是那么个动静——我因此也搞出了不少节奏。

有一次，我在娱乐厅，深夜，没几个人，我拿了个垃圾桶，开始敲打桶底。楼底下的一个家伙跑上来，说，“嗨！你打鼓啊！”说来说去，他才是个真懂打鼓的，他教我怎么演奏古巴手鼓（Bongo）。

音乐系有个家伙，收藏了一些非洲音乐唱片，我就到他家里打鼓。他还为我录了音，后来在他的晚会上，他玩儿一个游戏，名叫“非洲还是伊萨卡？”他放一些鼓乐，然后让大家猜，你听到的那个音乐，是在非洲大陆上弄出来的，还是本地的土产。这就是说，我那时候，相当擅长模仿非洲音乐。

等我去了加州工学院，我经常到日落大道那地方去。有一次，那儿有一群鼓手，领头儿的是从尼日利亚来的一个大块头儿的伙计，名叫尤卡努（Ukonu），在一个夜总会里奏的那个鼓乐，真叫妙——只有打击乐。那位副头儿，对我尤其好。邀请我上台和他们一起演奏点儿东西。于是我走到台上，和别的家伙们一起打了一阵子鼓。

我问副头儿，尤卡努可曾授课，他说，对。因此，我经常到尤卡努住处去，那地方离世纪大道（Century Boulevard）很近（那就是后来的瓦特骚乱[78]发生的地方），去听打鼓的课。课上得不太有效：他四处乱转，跟别人说话，各种各样的事情时不时地来打岔儿。但等他们工作的时候，大家都非常兴奋，我跟他学了不少。

尤卡努住处附近的舞会，白人没几个，但和今天相比，舞会悠闲得多。有一次，我们搞了个打鼓比赛，我打得不太好：他们说我鼓打得太“书生气”，他们的冲劲儿足得多。

有一天，那是加州工学院，有人给我打电话，语气严肃。

“我是技校的校长特劳布律治（Trowbridge）先生。”这是个很小的私立技校，就在加州工学院的斜对面。特劳布律治校长继续官腔十足地说：“我这儿有您的一位朋友，他想跟您说句话。”

“说吧。”

“哈喽，迪克！”是尤卡努啊！原来技校的校长，不像他把自己造作的那么官腔，他非常幽默。尤卡努到那个学校去为孩子们演奏，因此他请我过去，跟他同台演出。于是我们就一块儿为孩子们演奏了：我打古巴小鼓（放在我办公室的那个），来给他的大通巴（tumbak）鼓伴奏。

尤卡努定期做的一件事儿，是到许多学校谈非洲鼓，鼓点儿是什么意思，谈音乐。他性格很好，笑容可掬：他是个很好很好的人。他鼓打得摄人魂魄——他出过唱片——却在这儿学医。在尼日利亚爆发了战争的时候——或许是在战争之前——他回国了，我不知道他怎么样了。

尤卡努离开之后，我鼓打得不多了，除了偶尔在晚会上打打，给大家助助兴而已。有一次，我在罗伯特·莱顿（Leighton）家作客吃饭，他

儿子拉夫（Ralph）和一个朋友，问我想不想打鼓。想到他们这是要我唱独角戏，我说不想。但他们接着就在几个小木头桌子上敲开了鼓点儿，这我就忍不住了：我也拉来张桌子，我们三个在这些小木头桌子上演奏，弄出好些非常有意思的声音。

拉夫和他的朋友汤姆·鲁提少瑟（Tom Rut-ishauser）都喜欢打鼓，我们开始每周聚会，即兴演奏，琢磨节奏，弄点儿玩意儿。这两个家伙是真正的音乐家：拉夫弹钢琴，汤姆拉大提琴。我干的，是节奏，音乐我是一窍不通，在我看来，我打的节奏不过是不同音高的鼓点儿而已。但我们搞出了许多很好的节奏，还在几个学校演奏来逗孩子们开心。我们还在当地的一个学院的舞蹈班演奏节奏——我在布鲁克林工作的那一阵子，也这么寻开心——我们自称“三夸克乐队”，因此你可以琢磨出那是什么时候的事儿。

有一次我到温哥华给学生讲课，他们在地下室里举办了一个晚会，一个真正火辣的摇滚风格的乐队在演奏。这个乐队很不错：他们有一副多余的颈铃放在那儿，他们怂恿我玩儿这个东西。我于是就玩儿了一会儿，因为他们的音乐节奏感太强（颈铃只是个陪衬——你不会把音乐搞乱），我还真玩得起劲儿了。

晚会结束后，组织晚会的那家伙告诉我，乐队长说：“嚯！那个过来玩儿颈铃的家伙是谁啊！他还真能用那么个玩意儿弄出个节奏来！顺便问一句，这个晚会是为一个大人物开的——你知道，他压根儿没来，我还没看见他是谁呢！”

加州工学院有个剧团。有些演员是学院的学生，另外一些是从外边儿来的。每当有个小角色，比方说，一个警察，要来逮捕一个人，他们就让一个教授来演。这总是个很有效果的玩笑——教授上台了，抓走一个人，又下台了。

几年前，这个剧团正在演《男生和女生》（Guys and Dolls），有一场戏，是男主角把个女孩儿带到了哈瓦那，他们在一个夜总会里。导演认为，让我来演戏台上的这个夜总会里的一个桑巴鼓手，这个主意不赖。

第一次排演，我去了，正在导演的那个女士，指着乐队指挥说：“要杰克把乐谱拿给你看看。”

哎哟，我可傻眼了。我不会读乐谱。我还以为，我做的不过是到台子上弄出点动静而已。

杰克坐在钢琴跟前，他指了指乐谱，说：“好了，你从这儿开始，你看，你弄这个。然后呢，我弹卟嘟、卟嘟、卟嘟”——他在钢琴上弹了几个音符。他翻开这一页。“然后呢，你演奏这个，接着我们俩都停下来，让他们念台词儿，看到吧，就这儿”——他又翻了几页，说：“最后，你演奏这个。”

他给我看的这种“音乐”，是某种发疯的小×，夹在竖线和横线之间。他一个劲儿跟我说这玩意儿，以为我是个音乐家呢。要我记住这个，完全不可能。

幸运的是，第二天我病了，不能参加下次排演了。我求我的朋友拉夫替我去，因为他是个音乐家，他该知道那都是什么玩意儿。拉夫回来说：“事情不是那么糟糕。首先，在开始的时候，你必须弄得准才行——因为是你为乐队其他人定节奏的，好让他们踩着点儿跟进来。但是，等乐队进来了，那就类似于即兴演奏了，再就是有的时候，我们得为台词儿停一停，但是，根据乐队指挥的手势，我觉得我们能琢磨出什么时候该停。”

可同时我已经让导演接受拉夫了，这么说，我们两个都得上台了。他打通巴，我打手鼓——这使我觉得容易得太多了。

拉夫告诉我这个节奏是怎么个样子。那一定只敲二十或三十下，但不可多敲，也不可少敲。我从来也没像这样玩儿过，敲准了，还真不容易。拉夫耐着性子给我解释，“左手，再右手，再双手，然后右手……”我干得很卖力，最后，慢慢地，我开始能把节奏刚好敲得准。这花费了好漫长的时间——好多天——才掌握了。

一个星期之后，我们去排演，发现了那儿有个新鼓手——一直在那儿的那个鼓手，干别的去了——我们向他做了自我介绍。

“嗨。在哈瓦那那场上台的，就是我们俩。”

“哦。嗨。让我在这儿找找那场……”他翻到那场戏在的那一页，摸出鼓槌，说：“哦，这一场，是由你们起头儿的，这么弄……”他拿鼓槌敲鼓边儿，乒梆、梆啊梆、乒啊乒、梆梆，快得不能再快了，他眼还看着乐谱呢！没治了！我忙活了四天啊，才搞准了那个鬼节奏，他却信手就打起来！

无论怎么说，经过一遍又一遍的练习，我最后也打得准了，而且真在剧里打呢。演出非常成功：人人都喜欢看这位教授在台上打手鼓，音乐也不那么坏。但是，开头儿那部分，不能乱改的：真是难。

在哈瓦那夜总会那场戏里，几个学生必须按照舞蹈设计来跳某种舞。因此，导演找到了加州工学院一家伙的妻子，那个时候，她在“环球电影厂”（Uni-versal Studios）当编舞，来教小伙子们怎么跳。她喜欢我们的鼓乐。等戏演完了，她问我们愿不愿意为旧金山的一个芭蕾舞团打鼓。

“什么？”

是的。她即将到旧金山，为那儿的一个小芭蕾舞学校的一个芭蕾舞当编舞。她想创造这么一种芭蕾舞，音乐全是打击乐。她希望拉夫和

我，在她启程之前，到她家一趟，去演奏一下我们知道的不同的节奏。根据我们打的节奏，她将编一个与节奏相配的故事。

拉夫有点儿担心，但我唆使他去冒这个险。然而，我强烈要求她不要告诉那儿的任何人，说我是物理学教授，诺贝尔奖的得主，或者什么其他的大烟袋。正如塞缪尔·约翰逊[79]所言，如果你看到一条狗用两条后腿走路，了不起的不是它走得多么好，而是它竟然那么个走法。如果我打鼓仅仅是打而已，我就不愿意打鼓了；如果大家仅仅把我当成个喜欢打打鼓的物理学教授，我就不喜欢了。我们就是她在洛斯阿拉莫斯找到的音乐家嘛，来到这儿来演奏他们做的这个鼓乐。

于是我们就去了她家，演奏了我们编的好多种节奏。她做了记录，很快地，就在当天晚上，她脑袋里编制出了一个故事，说："得，这一段，我要求重复五十二次；那一段，四十小节长；还有这个、那个，这个、那个……"

我们回家了，第二天晚上在拉夫家里录了一盘磁带。我们花了几分钟，演奏了全部的节奏，然后拉夫用他的录音机剪剪接接，让每段长度合适。她动身的时候，带了一份我们的磁带，开始在旧金山训练她的舞蹈家们。

与此同时，我们不得不练习磁带上的那些东西：这一段，循环五十二次，那一段，循环四十次，等等。我们当时即兴演奏的东西（又经过剪辑），现在却不得不亦步亦趋地学会。我们不得不模仿我们自己的倒霉磁带！

节拍掐得准，是个大问题。我认为拉夫会知道怎么个弄法，因为他是个音乐家嘛，可我们俩都发现这事儿滑稽。在我们的脑袋里，"演奏部门"也是管掐节拍的"说话部门"——我们不可能同时又演奏，又数节拍！

等我们到旧金山进行首次排练的时候，我们发现，看着舞蹈演员，我们就不必掐节拍了，因为舞蹈演员的动作是有章可循的。

因为人家把我们当成了专业音乐家，而我不是，我们遭遇到了许多事儿。比方说，有一场戏，说的是一个乞讨的妇女，在加勒比海的海滩上筛沙子，而那些上流社会的贵妇人们就在那海滩上，她们在这个芭蕾舞剧一开始的时候就上场了。编舞用来创造这一场景的那个音乐，用的那个特别的鼓，是拉夫和他爸爸在好几年前以业余手法造的一个东西，我们怎么也不能让它弄出好听的声音来。但是，我们发现，如果我们坐着椅子面对面，把这个"神经错乱的鼓"夹在我们的膝盖中间，一个家伙打，哔嗒、哔嗒、哔嗒、哔嗒、哔嗒，用手指快快地打，不停地打，另一个伙计，用两只手在不同的地方挤压这个鼓，它就会变调儿。它现在就弄出这种怪有意思的动静：卟嗒、卟嗒、卟嗒、哔嗒、呗嗒、呗嗒、呗嗒、哔嗒、卟嗒、卟嗒、卟嗒、吧嗒。

好了，演丐妇的那个舞蹈演员，希望音乐有起有伏，来应和她的舞

蹈（我们的磁带上的鼓乐，和这场不搭界），于是她就进一步为我们解释她要怎么跳：“首先，我这样做这四个动作；然后呢，我这样前倾，筛沙，筛八个数；然后呢，我站起来，再这么个转法。”孙子才跟得上这一大套，于是我打断她的话头。

“你只管去跳，我随着你演奏。”

“但你不想知道这个舞是怎么往下走的吗？你瞧，等我筛了第二下子沙的时候，我就这么个样子来它八下子。”这没用！我什么玩意儿也记不住，我又想打断她，但是接着就有这么个问题：我看起来不像个真正的音乐家啊！

很好，拉夫非常圆滑地给我打圆场，他解释说，“对这种情况，费曼先生有独特的处理技巧：在他看着你跳的时候，他宁愿把这个舞蹈的动力学原则，直接地、直觉地，发展出来。让咱们像那样试一把，要是你不满意的话，我们可以再作修正。”

噢，她是个一流的舞蹈家，你可以预见她下面怎么个跳法。如果她要去挖沙，她会摆出个往沙里拱的架势。每一个动作，都是平滑的，都在你的预料之中，这我就非常容易用手弄出卟呲、卟啥啥、卟嗒嘶、哔嗒嘶这样的声音，和她正在弄的舞蹈动作，配合得天衣无缝，她对此很满意。我们就这么混过去了，差点儿露了馅儿。

这个芭蕾舞，算是成功的。尽管观众不多，但那些来看演出的人，非常喜欢它。

在我们到旧金山排练和演出之前，我们对这整个主意，把握不大。我的意思是，这位编舞愚不可及：首先，这个芭蕾舞只有打击乐；其次，我们还没好到能为芭蕾舞作曲的地步，无功受禄，实在是疯了！就我而言，我从来没有什么“文化”，到头来却为一个芭蕾舞当起了职业音乐家，这是一个巨大的成就，就是嘛。

我们原以为她找不到愿意随着我们的鼓乐跳舞的芭蕾舞演员。（事实上，就有一位是来自巴西的大明星，葡萄牙领事夫人，认为她跳这个舞，掉价儿。）但其他的舞蹈家好像非常喜欢它，当我们在第一次排练中为她们伴奏的时候，我心甚慰。当她们听到我们的节奏真正是怎么个动静的时候（此前，她们一直用一个小卡式录音机来听我们的磁带罢了），她们所感到的那种愉悦，是发自心底儿的；当我看到她们对我们的现场演奏是怎么样反应的时候，我信心大增。从来看演出的人们的评论来看，我们意识到，我们大功告成了。

这位编舞想在第二年开春，还用我们的鼓乐搞另外一个芭蕾舞，于是我们又重复了一遍这个程序。我们录了个磁带，节奏更多，她也编制了另外一个故事，这一次，背景是在非洲。我和加州工学院的芒格（Munger）教授谈过，学会了几个真正的非洲短语，好在开头儿时唱（噶哇—巴女吗—噶哇—喔，或者类似这么一种调子吧），我练习发

音，练得还真像是那么回事儿。

后来，我们到了旧金山排练了几场。我们刚到的时候，发现她们有个麻烦。她们不知道怎么把象牙弄得在台子上好看。她们用纸糊的象牙太难看。在这种象牙面前跳舞，几个舞蹈演员都觉得尴尬。

我们没提供什么解决方案，只是静观表演家们下星期来排练的时候，会有什么事儿。与此同时，我安排好了去访问维尔纳·埃哈德（Werner Erhard）教授，我是在他主办的一个会上认识他的。我在他漂亮的家里坐着，听他给我解释什么哲学或者观念，突然之间，我一下子进入了催眠状态。

“你这是怎么了？”

我爆着眼珠子叫：“象牙！”就在他身后，在地板上，放着一些巨大、粗壮、漂亮的象牙！

他把象牙借给了我们。这些象牙，在戏台上漂亮极了（演员们松了一口气）：真正的象牙，超大的象牙，谢谢维尔纳·埃哈德的好意。

我们的编舞转移到了东海岸，在那儿上演他的加勒比芭蕾舞。我们后来听说，她用那个芭蕾舞参加全美国的编舞大赛，得了第一名或者第二名。受了这一次成功的鼓舞，她参加了另一次比赛，这次是在巴黎，是全世界的编舞大赛啊。她带去了我们在旧金山录制的一盘高质量录音带，在法国那儿训练几个舞蹈演员，来演出那个芭蕾舞的一个小片断——她就是那么进入大赛的。

她干得真不赖。她进入了最后一轮，剩下的只有两个团——拉脱维亚的一个团，用正统的舞蹈演员，跳标准的芭蕾舞，伴以漂亮的古典音乐；一个美国的团，独行其是，只用两个演员，是她在巴黎训练的，跳的那个芭蕾舞，除了鼓乐，没有别的。

观众最喜欢她，可是那个比赛，不看谁最受欢迎，评委们判拉脱维亚人获胜。她后来去找评委，想知道她的芭蕾舞，弱点何在。

“哦，夫人，音乐不太令人满意，不够细腻。渐强音控制欠佳……”

如此说来，我们起码可以发现：等我们来到那些真有文化的巴黎人面前的时候，他们懂得鼓乐，我们就不及格了。

另类状态

我曾经每星期三到休斯飞机公司（Hughes Air-craft Company）去讲一堂课，有一天，我去得稍微早了些，就和那个接待小姐打情骂俏，像往常一样，偏偏这个时候来了六七个人——一个男的，一个女的，还

有另外几个。我以前没见过这些人。男的说，“费曼教授是在这儿讲座吗？”

“找对地方了。”接待小姐回答。

男的问，他这帮人能不能来听听课。

“我觉得你们不会太喜欢，”我说，“讲的是某种专业的玩意儿。”

很快，那女的，她很聪明，咂摸出味儿了：“敢情你就是费曼教授！”

后来才知道，那男的就是约翰·力利（John Lil-ly），他早先研究过海豚。他和他妻子做过一些感觉缺失的研究，建造了一些箱子。

“在那种情况下，你会发生幻觉，确有此事？”我兴致勃勃地问。

“确有此事。”

我总是对梦境和其他闯到你心灵中的形象着迷，这些东西没有直接的感官来源，这东西在脑袋里是怎么搞的，我想看看幻觉。我一度想吃毒品，但我有点儿害怕这个：我喜欢思考，我不想把这个思考的机器报废了。但是，就那么躺在感觉缺失的大箱子里，在我看来，似乎不会有什么心理上的危险，因此，我急不可待地想尝试一下。

我很快就接受了力利两口子的邀请，要去试试大箱子。从他们那方面讲，这邀请是个好意，他们也和他们那帮子人来听我讲课嘛。

因此，下个星期，我就去尝试大箱子了。力利先生为我介绍大箱子，他对其他人也得这么解释。里头有许多灯泡儿，跟霓虹灯似的，里头有不同的气体。他给我看了元素周期表，还神秘兮兮、装腔作势地说了一些不同的灯有不同的作用的话。他告诉我，你怎么把鼻子顶着镜面看自己，这是准备着进入大箱子——装神弄鬼、怪里怪气的事儿，应有尽有。我没在意那些胡说八道，但我亦步亦趋地都照着做了，因为我想进大箱子，我也想，或许这样的准备工作，能使你比较容易地得到幻觉。因此，我照他说的，什么都做了。唯一困难的事儿，是选择我希望的颜色的灯，特别是想到这箱子里该是一片黑暗。

感觉缺失箱，像个大澡盆，但有盖儿盖着。里头伸手不见五指，因为盖子很厚，里头也没声音。有个小气泵，往里打空气。但是，我后来知道，你用不着担心空气的事儿，因为里头的空气体积很大，你在里头只待两三个小时，在你呼吸如常的时候，你实际上消耗不了太多空气。力利先生说，在那儿弄了气泵，是安慰人心的，因此我琢磨出那仅仅是心理作用，就要他把气泵关了，因为它有点儿噪声。

箱子里的水里有泻盐，它就比普通的水密度大，因此你很容易漂

着。温度控制得和体温一样——他都计算过了。里头应该没有光，没有声音，没有温暖感，什么也没有！偶尔你或许会漂到边儿上，轻轻地触到箱壁，或者由于顶壁上的凝结作用，或许会落下一滴水来，但这种小小的扰乱是很稀罕的。

我一共去过十几次，每次在箱子里待大约两个半小时。第一次，我没什么幻觉。但是，既然我已经进过箱子，力利两口子就把我介绍给一个据说是医生的人，他告诉我一种药，叫克他命（ketamine），这是做麻醉剂的一种药。和在你入睡的时候发生的事儿有关系的问题，或者和你突然发生故障的时候发生的事儿有关系的问题，我一直很感兴趣，因此他们给我看了那种药的说明书，给了我正常剂量的十分之一。

我这种感觉透着怪。每当我想分辨出这是个什么作用的时候，我从来也不能搞得清楚。比方说，这种药，对我的视觉很有作用。我觉得我看不清楚东西，但是，当我努力看什么东西的时候，没问题。类似是这么回事儿：好像你不在乎看不看东西似的，你干干这个，干干那个，一种糊里糊涂的感觉。但是，你一看东西，你一集中精神，起码有那么一小会儿，一切正常。我拿过他们的一本书，有机化学的书，看一个表格，复杂的东西，写得满满的，我很吃惊，我能读那些东西。

我还干了各种各样其他的事儿，比方说，把两只手从老远往一块儿靠，看能不能让手指头互相碰在一起，尽管我有一种全然失去方向感的感觉，一种无能于真的做事儿的感觉，但我从来也没有发现有一件事儿，我做不了。

前面说过，第一次，我全然没有幻觉；第二次，我全然没有幻觉。但是，力利两口子，是两个很有意思的人，跟他们在一块儿，我非常非常愉快。他们经常给我午饭吃，等等。过了一阵子，我们开始讨论另一个层次的事儿，不像开始那样谈灯的事儿。我发现，别人觉得感觉缺失箱子，不知怎么，可怕，但对我而言，那是一种很有意思的发明。我不害怕，因为我知道那是什么玩意儿：那不过是一个装着泻盐水的大箱子罢了。

第三次，有个男人来访——我在那儿见到过许多有意思的人——他告诉人家，他名字叫巴巴·拉姆·达斯（Baba Ram Das）。他这个伙计，是哈佛大学的，到过印度，写了本书，名叫《此时此地》（Be Here Now）。他讲述他的印度大师教他如何得到“魂魄出窍的体验”（这种字眼儿，我在布告栏里经常看到）：凝神于气息，凝神于气息怎么样从你的鼻孔进进出出。

为了得到幻觉，我想，我是什么都会试的，于是我就进了箱子。在这个游戏进行到某个阶段的时候，我突然意识到——这很难解释——我向旁边移了一英寸（约2.5厘米）。换句话说，我不是在我正中间呼吸，一吸一呼，一吸一呼：我的自我往边儿上移动了一点儿，大约移动了一英寸。

我想："现在，我的自我在什么部位？我知道，人人都认为，思想的宝座，在大脑里，但他们怎么知道是那样？"通过读书，我已经知道，在大量的心理学研究搞出来之前，自我在哪儿，大家不是那么清楚。比方说，希腊人认为，思想坐落在肝里。我百思不得其解："孩子们看到人家摸着脑袋说，'让我想想'，就了解到自我坐落在哪儿，可不可能是这样？因此，自我坐落在上头那儿，在眼睛背后，这么一个观念，就相沿而成了！"我琢磨着，如果我能把我的自我往边儿上移动一英寸，我就能把它移动得更远些。这就是我的幻觉的开始部分。

我努力尝试，过了一阵子，我顺着脖子，把我的自我弄到了胸膛正中间。在有一滴水落到我肩膀上的时候，我觉得这滴水是在"上方"，在"我"所在的地方的上方。每有一滴水滴下来，我都打一激灵，我的自我就顺着脖子跳回本来的地方。起先，每次要下去，得费不少事；但是，渐渐地，事儿容易了。我能把我的自我一路送到耻骨那儿，偏在一边儿；但有一阵子，我只能走得那么远了。

另有一次，我在箱子里，那次我决定看看我能不能把自己移到耻骨那儿，我应该能彻底到我的身体外头去。因此，我能"在我不在的另一边儿"。这很难解释——我动动两只手，拨拉水。尽管我看不见我的两只手，但我知道手在哪儿。但是，和真实生活里的不同，在真实生活里，手是一边儿一只，位置靠下，现在两只手却在同一边儿！我手指头上的感觉，其他的一切，都跟往常一模一样，只是我的自我在我身外，"观察着"这一切。

从那以后，我几乎次次都有幻觉，还能把自己移动得越来越远，一直移到我身体之外。后来弄到这个地步：当我晃动手的时候，我把手看成了某种机械的东西，一上一下地动——手不是肉的了，是机械。但我仍然能感觉一切东西。感觉和动作完全协调一致，但我也有"他在那儿"这么一种感觉，"我"甚至到了屋子外，最后，我在游荡，走过了一段距离，到了我以前看到过发生什么事儿的一些地方。

我有许多种类的灵魂出窍的经历。有一次，比方说，我能"看到"我后脑勺，还把手放在后脑勺上。当我动手指头的时候，我看见手指头在动，但是在四个指头和大拇指之间，我看到了蓝天。当然，那是不对的，那是个幻觉。但是，值得注意的是，在我动手指头的时候，手指头的动作和我想象的我正在看到的动作，是完全协调一致的。整个景象将出现，和你感觉到的、做的事情是一致的，这和你早晨慢慢起来的时候很相似，你碰到什么东西（你不知道那是什么东西），突然事情清楚了，你知道那是什么。因此，这整个景象突然出现，只是它不同寻常，这意思是说，你通常是想象自我坐落在后脑勺的前头，可现在，你却把自我想象得在后脑勺的后头。

在我有了一个幻觉的时候，在心理上，有一件事儿，总让我闹心：我或许是睡着了，因此那就仅仅是做梦罢了。和梦有关的体验，我已经有了，我想要新的经验。那是一种傻呆呆的状态，因为，在你有了幻觉

的时候，事情是那么个样子，你就不十分敏锐，因此你就让你的心灵去做这些傻事儿，比方说，去检查你不是在做梦，因此，我总是检查我是不是在做梦——因为我的手经常在脑袋后头——我就互相摩擦两个大拇指，前前后后地摩擦，找到感觉。当然，我倒可能是梦见到了这些，但我没做梦：我知道那是真的。

在开头这段时间，你有了幻觉就兴奋，这一兴奋，幻觉就“跳出去了”，或者停止了。这段时间一过去，我就能放松下来，就能有长时间的幻觉。

一两个星期之后，对照计算机怎么工作——特别是信息是怎么储存的——对脑子是怎么工作，我想了很多。这个领域的有趣问题之一，是记忆是怎么储存在脑子里的：和机器相比，你能从如此多的不同方向把记忆调出来——要得到记忆，你不必用一个正确的地址直接奔它而去。如果我想得到“rent”（租借）这个词儿，比方说，我要用这个词儿来填拼字游戏，这个游戏有个词儿，开头儿是“r”，结尾是“t”；我可以想起各种各样的收入，或者想起像借入和借出这样的活动；想到了这些，那就可以导致各种各样的其他记忆或信息。我在琢磨怎么搞出一个“会模仿的机器”，它将像小孩儿那样学语言：你可以和这个机器谈话。但是，我琢磨不出怎么把一些事情有条理地储存起来，以便这机器根据自己的需要，把它再调出来。

对这个发现，我一时洋洋自得，出了箱子，冲了澡，穿上衣服，开始驾车到休斯飞机公司上我每周一次的课。大约是在我从箱子里钻出来45分钟之后，我第一次突然意识到，关于记忆是怎么储存在脑子里这问题，我是一丁点儿想法也没有。我的那些想头儿，全是个幻觉，是关于怎么把记忆储存在脑子里这问题的幻觉！我“发现”的东西，和记忆在脑子里的储存方式，风马牛不相及。它和我跟我自己玩儿的这些游戏，倒真有关系。

在我早先访问力利两口子的时候，在许许多多关于幻觉的讨论中，我一直竭力向力利和其他人解释：东西是真的，这么一种幻觉，并不反映真实的现实。如果你看到了一些金球儿，或者看到了别的什么玩意儿，看到了好几次，而且，在你发生幻觉的过程中，这些金球儿还跟你谈话，告诉你，它们是另外一种智力生物，这不意味着它们真是另外一种智力生物，只意味着你得到了这么一种特别的幻觉而已。就是这个时候，我有了这么一种强烈的感觉，要发现记忆是怎么储存的。令人惊讶的是，花了45分钟，我才意识到，我一直向人家解释的那个玩意儿，是个错误。

我考虑的一个问题是，幻觉，是不是像梦那样，受到你心里已有的那些东西的影响？——那些东西，来自你当天或者以前的经历，或者来自你希望看到的那些东西。我相信，我有灵魂出窍的经验，其原因，是就在我要钻进箱子之前，我们讨论的，就是灵魂出窍。我有关于记忆怎么储存在脑子里的这样一个幻觉，我认为，其原因是，我整整一个星期

一直在思考那个问题。

关于经验的真实性问题，在那儿，我和各种各样的人进行了大量讨论。他们争辩说，在经验科学中，如果关于某事的经验可被重复产生，那么某事就被认为是真的。因此，当许多人看到金球儿跟他们说话，多次都是这样，那么那些金球儿就是真的了。我的主张是：在这种情况下，在有人进入箱子之前，讨论到了那么一点儿关于金球儿的事儿，因此，这个人在进入箱子的时候，他那心灵已经在想着金球儿的事儿了，他在幻觉中的时候，就看到了近似于金球儿的某种东西——也倒可能是蓝色或者什么色的球儿——他就认为他在重新制造出这种经验。有些人，就有一种随声附和的趋势，他们之间的那种一致意见，和你在实验当中得到的那种一致意见，这两者在种类上的区别，我觉得，我是明白的。说出这种区别，何其容易——但给它个精确的定义，却是这么难，这事儿真让人忍俊不禁！

我相信，在幻觉当中，没有什么玩意儿，能够超过身在这个幻觉之中那一个人的内在心理状态。但是，尽管如此，还是有许多人经历了许多经验，他们相信，在幻觉中，有真实在。我的这个看法，或许能够解释，为什么释梦者能取得不小的成功。举个例子，有些精神分析学家，谈论各种各样的象征物的寓意，这就算是对梦的解释。然后呢，这些象征物果真接着就出现在梦境中，这也不是完全不可能的啊。因此，我认为，也许是这样，对幻觉和梦的解释，是一种自体繁殖的过程：多多少少，你会一般性地成功解释它，特别是在你发生幻觉或梦境之前，跟人家仔细讨论过这种事儿。

一般说来，我花大约15分钟就能让一个幻觉运行起来。但是，有几次，我事先吸了一点儿大麻，幻觉就来得很快。但15分钟，对我来说，已经足够快了。

经常发生的一件事儿，是这样：正当幻觉在进行着的时候，会出来一些可以说是“垃圾”的玩意儿，有些直接就是乱七八糟的形象——纯粹的、随机的废物。我试图记住某些垃圾，以便能对它们再梳理一番，但要记住，可难了去了。我想，我能接近在我开始沉沉入睡的时候发生的事儿：清晰的逻辑联系是有的，但是，是什么东西让你想起了你正在思考的那个东西，你却记不得了。实际上，你很快就忘记了你正在努力要想起来的东西。我只记得和芝加哥的白色路标类似的东西，上头还有个小凸物，然后它紧接着就消失了。总有这类东西。

力利先生有多种不同的箱子，我们也做过许多不同的实验。从幻觉这一角度说，那些箱子，似乎没什么不同，而且，我开始确信，这种箱子，是不必要的。既然我看明白了怎么搞法，我就意识到，你只需要安安静静地坐着就成——费事搞这些绝对超级的大骗术，有必要吗？

因此，等我回家的时候，我就把灯都关了，在客厅的一把舒服的椅子里坐着——试了又试——怎么也不灵。在感觉缺失箱子之外，我从来

没能发生幻觉。我当然喜欢在家里体验幻觉，我不怀疑，如果你多多练习，你也可以陷入冥想和幻觉，但我不想练习。

野狐禅科学80

中世纪，发疯的念头儿，五花八门，比方说，犀牛角能壮阳。然后就发现了一个办法，来把这些发疯的念头儿按种类分开——这方法是拿一个念头儿来试试，看它灵不灵；如果不灵，清除之。这种方法系统化了，当然，系统化为科学了。这方法发展得很不错，因此我们现在就处在科学的时代了。置身于这么一个科学时代，事实上，我们都很难理解巫医怎么可能曾经存在过，他们当时提出的那些玩意儿，确实没有灵的——或者说，灵的只有一丁点儿。

但是，即使在今天，我也能碰到不少人，说着说着，就把我扯进了飞碟、占星术、某种神秘、意识感应、另类知觉、超感官知觉，杂七杂八的。我的结论：现在还不是一个科学的世界。

大多数人相信这么多的奇妙事儿，我就决定调查一番他们为什么相信。一直有人说我有探究的好奇心，他们说的这种东西，使我身处困境：在这儿，我发现了这么多的垃圾，简直能把我陷入灭顶之灾。我首先开始调查各种各样的神秘观念，还有神秘体验。我钻进了封闭的箱子里，得到了若干小时的幻觉，因此我就知道了幻觉的一些事儿。然后，我到了伊萨伦（Esalen），这个地方，是这类思想的温床（那是个奇妙的地方，你该去一趟）。我又遭到了灭顶之灾。我没想到，那种玩意儿，会有那么多。

在伊萨伦，那儿有一些大浴室，温泉供应热水，建在高于海平面30英尺（约9.1米）的礁石上。我有一次最愉快的经历：我坐在一家浴室里，俯瞰海浪拍打那岩石嶙峋的海岸，仰视万里无云的碧蓝长天，研究那个美丽的裸体悄然无声地出现，把自己安顿在我身处其中的这个浴池里。

有一次，我坐在一个浴池里，其中有一个漂亮的女孩儿，和一个家伙坐在一块儿，那家伙似乎并不认识她。我立刻就开始想："嚯！我怎么跟这个漂亮的裸体宝贝儿搭讪搭讪？"

我正琢磨着说什么呢，那家伙对她说："我呢，呃，正在研究按摩。能不能，在你身上做做练习？"

"当然。"她说。两个人出了浴池，她就近躺在一张按摩床上。

我心里想："这台词儿说得真叫棒！我是琢磨不出那种话头儿的！"他开始摩擦她的大脚趾头。"我想我摸到了，"他说，"我摸到了类似一个坑儿的东西——那是脑垂体吗？"

我脱口而出："伙计，你离脑垂体何止十万八千里！"

他们盯着我，惊骇莫名——我已经脱了浴衣——我说，"那叫足部反射疗法！"

我迅速闭眼，作冥思状。

那类让我头晕的事儿，这算是一例。我也考察过超感知觉和特异功能现象，最近的大热门儿，是尤里·盖勒（Uri Geller），据说这人用手指头搓搓钥匙，就能把它弄弯。于是我就接受他的邀请，去了他的旅馆房间，去看读心术和弯曲钥匙。他做的读心术，都不那么成功。我猜，没人能读得透我的心思。我的男孩儿拿着一把钥匙，盖勒就摩擦它，但什么事儿也没发生。然后，他告诉我们，在水下，比较灵验，因此你就看到我们全体都站在浴室里，水龙头打开了，钥匙在水下，他用手指头摩擦那个钥匙。什么事儿也没发生。于是我没办法研究这个现象了。

但是，我开始想，我们还相信什么呢？（我接着就想到了巫医。要检查他们的真伪，何其容易，只要看看什么也不管用，就可以了。）我发现，甚至有更多人相信的一些事儿，比方说，我们有一些知识，说的是怎么教育。有些好大的学校，教阅读法，教数学法，等等，但是，如果你留心点儿，你会看到，阅读能力是一路下滑——或者说，很难提高——但我们还是用相同的人来改善这种方法。确实存在由巫医开的不管用的药方。这事儿应该调查清楚，他们怎么知道他们的方法灵验？另一个例子是怎么处理罪犯。使用我们处理罪犯的那种方法，我们显然是没有取得什么进步——一大堆理论，但没什么进步。

然而，这些玩意儿，却被说成是科学。大家都在研究这些东西。我认为，具有常识的一般人，被这种伪科学吓呆了。一个很知道怎么教孩子们阅读的老师，受了学校体制的胁迫，不得不用另外的方法教阅读——甚至会被学校体制愚弄到这么一种地步，认为自己的方法不见得好。再如，坏小子们的父母，用这样那样的方法管教过孩子之后，却终生负疚，因为按照专家们的说法，她那么做是"不对的"。

因此，我们实在应该检查一下那些不灵的理论，检查一下并非科学的科学。

我认为，我提到的这些教育和心理学方面的研究，是这么一种事例，我愿意称之为"野狐禅科学"。在南太平洋，有一伙儿崇拜运输机的人。在二战期间，他们看到飞机落到地上，带来了很多好东西，他们希望现在也发生这样的事儿。因此，他们捣鼓了类似飞机跑道的玩意儿，在跑道两边儿还点了火堆，还造了一个木屋子，让一个男人坐在里头，头上戴着两块儿类似耳机的东西，竹子棍儿跟天线似的伸出来——他是个领航员——他们在等着飞机着陆呢。他们每件事儿做得都不错。形式是完美的。这看起来，的确就是从前那样子。但这一套不灵，没什么飞机着陆。因此，我把我说的那些事儿叫作野狐禅科学，因为那些事儿亦

步亦趋地照着看似科学研究的规则和形式来，但少了某种本质的东西，因为没有飞机着陆啊。

这就理所当然地迫使我告诉你，那少了的东西是什么。但是，这事儿解释起来，很难，和向南太平洋的岛民解释在他们的体制中必须怎么安排事儿才能得到一些财富，一样难。告诉他们怎么把耳机的形状弄得像回事儿，事儿不是这么简单啊。但是，我注意到，有一个特征，在野狐禅科学当中，通常是没有的。这个特征是这么一个观念，是我们都希望你在学校的科学研究中学到的那个观念——我们从来也不曾明明白白地说清楚这个观念是什么，我们只是希望通过科学研究的事例来让你把握它。因此，把这个特征说出来，明明白白地说出来，是有趣儿的。这个特征，是科学的正直品格，是科学思想的原则，它与一种彻底的诚实同声相应——一种把脊梁骨向后挺得笔直的风度。比方说，如果你在做一个实验，你应该把所有你认为或许会使这个实验无效的事情都报告出来——不仅仅是把你认为正确的东西报告出来：或许也能够解释你的实验结果的另外一些原因，以及你想到的那些在你的另外一次实验中已经得到清除的因素，以及这些因素是怎么起作用的，这些都要报告出来——让别的伙计确信，那些因素都已经被清除掉了。

有些细节，可能致使别人怀疑你的解释，如果你知道都是什么细节，那你必须交代清楚。你必须尽你所能，把事情解释到最好的程度——如果你知道什么东西是错误的，或者可能是错误的话。比方说，如果你要搞出个理论，要推广它，或者要提出来，那么你也必须把那些不同意这个理论的事实摆出来，就好像把那些同意这个理论的事实摆出来一样。还有一个更微妙的问题。你把好些观念拢到一块儿，要搞出一个精制的理论，这时候，你想弄确实，在你解释什么事情符合这个理论的时候，那些符合这个理论的事情，并不是当初让你有心去搞这个理论的那些事情。可是，这个完成了的理论，额外地也使别的什么事情得到了令人信服的解释。

总起来说，这个观念是，要努力把所有信息都摆出来，以帮助别人来判断你的贡献的价值。不要单单摆出那些会把他们的判断引导到这个或那个特别方向上去的信息。

解释这个观念的最容易的办法，是拿它与（比方说）广告做个比较。昨天晚上，我听说“维森”牌的食用油，不会渗到食物里头。这不是不诚实。但我说的这个事儿，并不仅仅是一个不要不诚实的问题，而是一个科学的正直品格的问题，这层次更高。如果在一定的温度下操作，那么没有什么食用油能渗到食物里头去，这个事实是应该加到广告词中去的。如果在另一个温度下操作，那么所有的食用油——包括“维森”油——都会渗到食物里头去。因此，那个广告传达的，是蒙人的玩意儿，而非事实，事实才是真实的。这个区别，我们非得搞清楚不可。

我们从经验中知道，真理总会出来。其他实验家会重复你的实验，会发现你是错还是对。自然的现象，将同意或者不同意你的理论。另

外，尽管你或许会得到昙花一现的名声和兴奋，如果你在这种或那种工作中不曾做到非常小心谨慎的话，你将得不到身为科学家的好声望。正是这种类型的正直，正是这种不把自己当傻瓜的审慎态度，才是那些野狐禅科学研究中在很大程度上缺少的东西。

他们的困境，有许多当然是主题上的困难，以及他们搞科学的方法不可能用到这个主题上去，然而，我们应该注意，这还不是唯一的困难。那就是飞机为什么不落地——但是飞机就是不落地嘛。

关于如何控制我们把自己当傻瓜的部分方式，我们已经从经验中学到了好多。举个例子：密立根[81]用下落的油滴做实验，来测量一个电子的电荷，得到的答案，我们现在知道，不很正确。它有误差，因为他用的那个空气黏滞性数值是不正确的。看看密立根之后测量电子电荷的历史，是很有趣儿的。如果你把那些测量活动看成是一个随时间而变化的函数，你会发现，一个比密立根的数大一点儿的数，下一个数又比这个比密立根的数大一点儿的数还大一点儿的数，再下一个数又比这个比密立根的数大一点儿的数还大一点儿的数再大一点儿的数，直到最后，这些数都安顿下来了，答案是一个更大的数。

为什么那些人没有立刻就发现最后这个新的比较大的数呢？这事儿让科学家们为之汗颜——这个令人羞臊的历史——因为，人们显然是这样做事儿的：当他们得到了一个比密立根的数大得太多的数的时候，他们以为一定有什么东西出错儿了——他们就去找，结果找到了一个解释的理由，说为什么某个东西或许错了。当他们得到了一个接近于密立根的数的数的时候，他们就不费劲去找了。因此，他们就把那些相去太远的数，都消灭了，然后再去做那样的蠢事。如今，我们已经了解了那些特别诱惑人犯错误的情况，现在我们就不犯这种病了。

但是，这个学习如何才能不把自己当傻瓜的漫长历史——一个有着彻底的科学正直品格的历史——是，抱歉我这么说，是一个我们还没有把它特别列入任何我所知道的课程之中的东西。我们只好希望，通过潜移默化，你能理解它。

首要的原则，是你万不可把自己当傻瓜——而你就是那个最容易被当作傻瓜的家伙。因此，对这件事儿，你务必非常留神儿。在你没把自己当傻瓜之后，不把别的科学家当傻瓜，就容易了。在那之后，你只需要像传统的方式那样，做到诚实无欺就可以了。

我愿意再补充点儿东西，这个东西对科学来说，并不必要，却是我相信的一种东西，这东西是，在你身为科学家跟外行人谈话的时候，你也不应该把他们当傻瓜。我不想告诉你怎么骗你妻子，怎么愚弄你的女朋友，以及诸如此类的事儿，那个时候，你也不打算以科学家的身份行事，你只想以普通的人类身份行事。我将把那些问题，留给你自己和你的牧师。我现在谈的是一种特别的、额外类型的正直品格，这种正直不是躺着撒谎（lying）[82]，而是脊梁骨向后挺直，来表明你自己或许是错

误的。在你身为科学家行事的时候，你非得有这种正直品格不可。你对其他科学家当然要如此正直，而我认为，对外行，亦复如是。

比方说，有一次我和一个朋友谈话，他要上广播电台说话，我有点儿吃惊。他是搞宇宙论和天文学的，他不知道怎么解释他的工作有什么实用价值。“哦，”我说，“没什么实用价值。”他说，“对，但那样说，我们就得不到资金赞助来进行进一步的研究了。”我认为，那是一种不诚实。如果你以科学家的身份出现，那你就应该向外行人解释你正在干的事儿——如果他们在那些情况下不想给你资金赞助，那是他们的决定。

这个原则的一个例子是这样：如果你决意要检验一个理论，或者你想解释某个观念，那么你应该总是按照它出来时的那个样子发表。如果我们只发表某种结果，我们是能把这个论点搞得好看的。我们一定得把两种结果都发表了。

我得说，在给政府提某种类型的建议的时候，这也是重要的。假定有个参议员来征求你的意见，问你应不应该在他那个州钻个洞。你呢，看准了在别的州钻那个洞会比较好。如果你不发表这样的结果，在我看来，你没提出科学的建议。你是被利用了。如果你的回答，碰巧和政府或者政客喜欢的方向一致，他们就可以根据他们的好恶把你的回答用作一个论据；如果你的回答跟他们顶着，他们压根儿就不发表了。那也不是提出科学的建议。

另外几种谬误，则具有品质低劣的科学的特点。在康奈尔大学的时候，我经常和心理学系的人谈话。有一个学生告诉我，她想做这么个实验——别人已经发现，在某些情况X之下，老鼠做某事A。她很好奇，想知道，如果她把情况变为Y，老鼠还会不会仍然做A。因此，她的建议，是在情况Y之下做实验，来看老鼠是否仍然做A。

我对她解释说，在她的实验室里首先重复另外那个人的实验，是必要的——在条件X之下做这个实验，看她能不能也得到结果A，然后再变为Y，并且看A变不变。那样她才会知道真正的差别是她认为的那个在她的控制之下的那个事儿。

得了这么一个主意，她很高兴，接着就去找他的教授。他的回答是，不，你不能那么做，因为那个实验已经做过了，你那是浪费时间。这事儿发生在1947年前后，不打算重复做心理学实验，只改变实验条件并看看发生什么事儿，似乎一直是那个时候的一般路数。

如今，发生同样事情的某种危险，也是存在的，甚至在这个口碑不错的物理学领域里，也是有的。用“国家加速器实验室”的大型加速器，有个人用重氢来做实验。我听到这事儿，大吃一惊。为了把他的重氢结果拿来和用轻氢做的实验可能有的结果做对比，他不得不利用别人在不同的设备上做的轻氢实验的数据。等有人问他怎么能这么搞，他说，那是因为这个项目没时间用轻氢在这个设备上做实验了（因为时间那么

少，而设备那么贵），因为做也不见得会有新结果。于是，在“国家加速器实验室”负责这个项目的这个人，出于公关目的，急于要得到新数据，为的是得到更多的资金，以使这个事儿继续下去。他们或许是在毁掉这个实验本身的价值，在毁掉这个实验的目的。按照科学的正直品格的要求来完成工作，这对在那儿的实验科学家来说，常常不容易。

然而，心理学中的全部实验，都不属此类。比方说，一直有许多实验，让老鼠在各种各样的迷宫里跑，诸如此类——结果不甚了然。但是，在1937年，一个叫杨格（Young）的人，做了一个非常有意思的实验。他搞了一个好长的走廊，沿着一边儿有许多门，老鼠就是从这些门进来的。沿着另一边儿也有许多门，食物放在那儿。他想看看他能不能训练老鼠从他把它们放开的地方往下数第三个门进去，无论他在什么地方放它们。不能。老鼠们立刻跑向前一次放了食物的那个门。

问题是：因为这个走廊造得这么漂亮，这么整齐一律，老鼠们怎么知道那就是以前的那同一个门？显然，那个门一定有什么东西，和其他的门不同。于是，他把那些门仔仔细细地上了漆，门面用的是质地完全相同的材料。老鼠仍然找得到是哪个门。于是，他认为，或许老鼠在嗅食物的气味儿，因此，在每次老鼠跑过之后，他都用化学药品把气味改变了。老鼠仍然找得到是哪个门。于是，他意识到，老鼠或许能借助看灯以及实验室的布置来找到是哪个门，就像任何懂常识的人做的那样。于是，他把走廊盖起来，老鼠仍然找得到是哪个门。

他最后发现，老鼠凭借在跑的时候地板发出的声音来找到是哪个门。他只需要把走廊放在沙里，就能确定此事。因此，他一个接着一个，把所有可能的线索都消除了，最终就能把老鼠愚弄住，它们也不得不学习从第三个门进去了。如果他对他的任何实验条件马虎了，老鼠都能知道。

从科学观点看，这是一个一流的实验。正是这个实验，才使遛老鼠的这种实验有意义，因为它揭示了老鼠真正使用的线索——而不是你以为它用的那些线索。正是这个实验，才说得准确你必须用什么实验条件，才能做到谨慎，才能把一个遛老鼠的实验中的一切置于控制之下。

我注意到这一研究的后续历史。下一个实验，以及下下个实验，都不曾提到杨格先生。他们都没有使用他把走廊放在沙里的这个标准，也不十分谨慎。他们不过是按照老办法遛老鼠罢了，对杨格先生的伟大发现毫不注意，他的论文，提也不提，因为他没有发现关于老鼠的任何事儿。实际上，他发现了你必须得发现的关于老鼠的全部事情！但是，对那样的实验毫不注意，本来就是野狐禅科学的一个特点。

另一些例子，是莱因（Rhine）先生和其他人的特异功能现象实验。正如许许多多人批评的那样——他们也对自己的实验进行批评——他们改善了实验技巧，因此实验效果越来越小，越来越小，越来越小，直到消失殆尽。所有研究超自然现象的心理学家，都在寻找某种可以重

复的实验——那种他们可以重复做并得到相同结果的实验——即便有统计学的意义也好。他们遛了一百万只老鼠——说错了，这次遛的是人——他们干了大量的事儿，得到了某种统计学上的效果。下次他们再试，不灵了。现在，你发现有人说，希望一个可重复的实验，本来就是个无关紧要的要求嘛。这是科学？

这个人，在他宣布辞去“超心理学研究所”主任之职的讲话中，也在宣讲一种新的制度。他告诉人们在将来要做的事儿，他说，他们必须做的许多事情中有一件，是确保他们只培养这样一些学生：他们已经显示了他们的能耐，这种能耐是要把特异功能的结果提高到一种可被接受的程度——不打算把他们的时间浪费在那些野心勃勃、患得患失的学生身上，这些学生只是碰巧得到了结果而已。在教学中实行这样的政策，是非常危险的——只教学生怎么存心得到某些结果，而不是教他们本着科学的正直品格来做一个实验。

因此，我对你们只有一个祝愿——祝你好运，到一个你能够自由地保持我刚才说的这种正直品格的地方去吧，在那个地方，你不觉得被迫需要维持你在一个组织中的地位或者财政支持，以及诸如此类的事儿，从而失去你的正直品格。祝愿你享有这样的自由。

译后记

《“别逗了，费曼先生！”》，现在翻译完了。我在想象，亲爱的读者，在你掩卷之际，我们是否会有相似的感受。

由于真能算在我们中国名下的诺贝尔奖得主一个也没有，我在读这本书的时候，我最想知道的是，这个人是如何努力工作才成为诺贝尔奖得主的。可是，费曼或许早就料到了这一点，而他偏偏不喜欢做你能够预料到的事情，所以他就没有在这个方面花费太多的笔墨，却对他的那些恶作剧啊、打鼓啊、在赌城的荒唐事儿啊，讲个不亦乐乎。仔细想来，他仍然满足了我们的好奇心：起码他这个诺贝尔奖，是玩儿出来的。

我甚至认为，全部的诺贝尔奖奖金得主，以及其他一切创造了伟业的人，或许都是玩儿出来的吧。你想必还听说过牛顿曾经把怀表当鸡蛋煮了，爱迪生曾经忘记了婚礼。只有那些在外头玩儿得流连忘返的儿童，才有可能犯下这种错误。这些作为玩家的大科学家和我们这些贪玩的人的不同之处，仅仅在于他们的玩意儿碰巧对文明发展有益，而我们却是空玩一场。

许多人相信像费曼这样的大科学家都是一些非常古板的人，是最能够忍受命令和规矩的好孩子，对枯燥乏味有免疫力。费曼的故事证明这种看法刚好与事实相反。头脑正如你的宠物狗，渴望充足的活动。并不出于现实目的地使用你的头脑，它就会成为一条活蹦乱跳的狗，那就是一种玩儿。许多人误以为无所事事、闲着发呆是一种福分，而不曾意识到那是一种扼杀生命力的苦刑。在一定程度之内，成就一件事情可能获得的快乐，与我们必须克服的困难大小成正比。由于科学是一件需要花费巨大脑力的事情，那么它可能带来的快乐也同样巨大。

我们天生具有费曼的资质。我们本来对书本和自然天生具有大科学家的那种好奇心。如若不信，你就观察那些才来人世不久的小孩儿。他们喜欢图画和书本，瞪着好奇的大眼，专注地观察这个新奇的世界。我们至今也不知道儿童怎么可能如此迅速地就掌握一门语言。一旦听说了“为什么”这个词儿，他们就不停地问“为什么”。他们的问题，只有最有创造性和想象力的科学家和哲学家才能够提得出来，把他们无知的父母问得恼羞成怒。

可是，一旦我们进了学校，这种蔑视一切成见的好奇心，很快就消失殆尽。学校，本来应该是一个教人喜欢书本的地方，一个鼓励好奇心的地方。可是，我们的学校把书本用做刑具，以羞辱和惩罚来“鞭策”学生，它要求我们像计算机那样记住东西，它以刁钻古怪的考题打击我们的自信，它敌视独立思考，结果它变成了一个消灭好奇心的屠宰场。那

些讨厌教育的教育家，还要把许多可怕的色彩涂抹在学习这件本为乐事的事情上，好像有的女人把辣椒或墨水涂在乳头上迫使孩子断奶似的。他们说，你必须“头悬梁、锥刺股”，“书山有路勤为径，学海无涯苦作舟”，好像他们不把学生吓晕，就心有不甘似的。在他们看来，教育和科学研究本身是苦差事，其价值在于它可能带来的实际利益，（这种卑琐的市侩习气！）因此使学生受苦，就理所当然，却不相信爱因斯坦的话：“学习是一种难得的乐事。”呜呼，这种短视的实用主义，至今仍然是统治我们的教育和科学研究的指针。

如何重建我们的教育哲学和制度，需要我们好好思考。这本书将为教育工作者和研究家提供一个生动的案例。费曼甚至专门谈到了教育的问题。他在书中对巴西教育的描绘和批评，要是放在中国教育体制的名下，不也很合适吗？

或许你觉得费曼这个人太过散漫，有时荒唐——但这是一种错觉。他实际上是一束激光。我们在书里看到的许多故事，不过是这束激光在燃烧钢板时飞溅出的火花。他在评审课本的时候，必得一本一本亲自看。他在参加一个会议的时候，如此不肯通融地与俗见作对。他对科学的正直品格提出的要求，使人肃然起敬。在此，你将会发现真人和俗人之间有什么不同。俗人的正经事，在真人的眼中，是荒唐的闹剧；俗人认为可以马虎通融的事情，真人挺直了脊梁骨，分毫不让。费曼之所以毫无顾忌地讲述那些荒唐事，明显地是对伪君子们的嘲弄。他无意要你认可他做的一切事情；他仅仅是以极端的方式，要求你正直而真实。他对皇家不恭敬，不意味着他认为诺贝尔奖本身没有价值。他难以忍受的是附着在这个奖金之上的许许多多俗人俗事。这是一种神人般的高傲姿态。你会发现，他对自己的人格和事业尊敬到无以复加的地步。与此相比，皇帝何足挂齿！你想必也能意识到，使他的生命如此灿烂的，是他最喜欢玩儿的一个东西，那就是科学。费曼这个人，有名士风度——不对，他是个英雄！却又是这么个可爱的英雄！

这是一本好书，它使我神思飞扬，它是一场精神的狂欢节。我真希望自己能像费曼这样，活得如此愉快，如此自由，如此饱满！年轻的读者，尽情吸收费曼的精神和灵性吧！为了成就一个伟大的人格，找一件真有意思的玩具，比方说科学，尽情玩儿吧！

我必须感谢我的朋友，山东大学外语学院的李绍明教授，一个我佩服得五体投地的翻译家，他阅读了全部的译稿，指出了若干处败笔！本书当中必定仍然存在不少缺憾，那要归咎于我自己的冥顽不灵。

王祖哲

2005年3月5日

济南山东大学文艺美学研究中心

250100

wzz@sdu.edu.cn

[1]得克萨斯州中东部一城市，位于达拉斯福特沃斯南部，造船和工业中心。——译者

[2]纽约州东部的一座城市，位于奥尔巴尼西北部莫霍克河岸。——译者

[3]贝尔（1847～1922），美国发明家，热情的教育家和改革家，以发明电话而闻名。——译者

[4]丹尼尔·伯努利（Daniel Bernoulli，1700～1782），瑞士物理学家和数学家。——译者

[5]约翰·斯图尔特·穆勒（John Stuart Mill，1806～1873），英国哲学家及经济学家，对19世纪英国的哲学、经济学以及政治学、逻辑学和伦理学产生过重大影响。他的著作《论自由》已由商务印书馆翻译出版。——译者

[6]托马斯·亨利·赫胥黎（Thomas Henry Huxley，1825～1895），英国生物学家，自达尔文在1859年发表《物种起源》起，他就成为达尔文的最早支持者，他清晰而通俗的演讲，对科学家和公众接受进化论思想发挥了很大的作用。——译者

[7]歌德的长诗《浮士德》里的魔鬼。——译者

[8]威廉·布拉德福·肖克利（William Bradford Shockley，1910～1989），生于伦敦的美国物理学家，1936～1956年在贝尔实验室工作，1956年他因研制晶体管方面的贡献而与他人共获诺贝尔奖。——译者

[9]美国新墨西哥州的一个县。第一颗原子弹和氢弹都是在此研制的。——译者

[10]在美国开展研制原子弹的“曼哈顿计划”的时候，这个地方是科学家们的旅馆和饭店。——译者

[11]转矩，作用在物体上使它转动或具有转动趋势的力矩。——译者

[12]阿尔弗雷德·诺思·怀特海（Alfred North Whitehead，1861～1947），英国数学家及哲学家，数学逻辑的创建人，他与伯特兰·罗素合著了《数学原理》一书，讨论数学的逻辑基础。——译者

[13]埃德加·道格拉斯·亚德里安爵士（Lord Edgar Douglas Adrian，1889～1977），英国生物学家，以对神经系统的工作原理的解释而与他人共同获得1932年诺贝尔生理学或医学奖金。——译者

[14]德特乐夫·沃尔夫·布朗克（Detlev Wulf Bronk，1897～1975），美国生理学和教育家。他研究的主题是感觉的性质、身体运动控制、神经的化学刺激、神经脉冲及其机制，以及通过电化学方法来测量神经纤维的耗氧量。——译者

[15]詹姆斯·杜威·华生（James Dewey Watson），1928年生的美国的生物学家；弗朗西斯·亨利·康普顿·克里克（Francis Henry Compton Crick），生于1916年的英国生物学家。他们与生于1916年的英国生物学家毛里斯·威尔金斯（Maurice Wilkins）共同合作，发现了DNA即脱氧核糖核酸分子的双螺旋模型，为此共同获得1962年诺贝尔生理学或医学奖。——译者

[16]马克斯·路德维格·亨宁·德尔布鲁克（Max Ludwig Henning Delbrück，1906～1981），出生于德国的美国生物学家，与出生于意大利的美国生物学家萨尔瓦多·爱德华·鲁利亚（Sal-vador E.Luria）以及美国遗传学家艾尔弗雷德·赫尔希（Alfred D.Hershey）合作发现了病毒的复制机制与遗传学结构，而共同获得1969年生理学或医学诺贝尔奖。——译者

[17]美国大学教授每7年一次的通常带薪的休假，用于旅行、科研和休息。——译者

[18]一种微小圆形的由RNA及蛋白质构成的微粒，发现于活细胞的细胞质中，且活跃于蛋白质的合成中。——译者

[19]詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831～1879），英国物理学家，以对光和电磁波之间的关系研究以及对气体分子运动论的创立而闻名。他的研究导致了20世纪几项重要的物理学发展，其中包括爱因斯坦的狭义相对论和量子论。——译者

[20]亨德里克·洛伦兹（Hendrick A.Lorentz，1853～1928），荷兰物理学家，1902年诺贝尔物理学奖得主。他的研究解释了塞曼效应，即磁场中的光源的光谱线分裂现象。——译者

[21]尤金·保罗·魏格纳（Eugene Paul Wigner，1902～1995），生于匈牙利布达佩斯的美国物理学家，以其对原子核结构的阐述以及关于质子和中子性质的量子力学理论，而与人共同获得1963年诺贝尔物理学奖。1930年开始在普林斯顿大学工作。他对核反应堆的发展卓有贡献。——译者

[22]亨利·诺里斯·罗素（Henry Norris Russell，1877～1957），美国天文学家，以对星体演化的研究而闻名，1900年在普林斯顿大学获得博士学位，1905～1947年任普林斯顿大学天文台台长。——译者

[23]约翰·冯·诺伊曼（John Von Neumann，1903～1957），出生于匈牙利的美国数学家，他开创了博弈论这个数学分支。1930年进入普林斯顿大学。在第二次世界大战期间，他是原子弹计划的顾问。——译者

[24]沃尔夫冈·泡利（Wolfgang Pauli，1900～1958），奥地利物理学家，1945年的诺贝尔物理学奖得主。他以对量子力学的“不相容原理”的定义而闻名。他多次做过普林斯顿大学“高等研究所”的客座教授。——译者

[25]阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein，1879～1955），德裔美国理论物理学家，他创立的狭义和广义相对论使现代关于时间和空间性质的观念发生突破性进展并给原子能的利用提供了理论基础。他以对光电效应的解释获1921年诺贝尔奖。希特勒执政后，他到了美国普林斯顿大学高等研究院工作。——译者

[26]一种儿童游戏：比方说，把一盒火柴随意撒开，然后一次只挑起一根儿，其他的不可碰动。——译者

[27]根据1975年在圣巴巴拉市的加利福尼亚大学“关于科学与社会的第一次圣巴巴年度讲座”中的一次讲话改编。“从低处看洛斯阿拉莫斯”是《洛斯阿拉莫斯忆事》（Reminiscenceof Los Alamos）中的九篇演讲中的一篇。[Reminiscenceof Los Alamos，1943～1945，edited by L.Badash et al.，pp.105～132.Copyright（c）1980by D.Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.]

[28]阿瑟·霍利·康普顿（Arthur Holly Compton，1892～1962），美国物理学家，因发现康普顿效应而与他人共获1927年诺贝尔奖。——译者

[29]哈罗德·克莱顿·尤里（Harold Clayton Urey，1893～1981），美国化学家，因发现氘（重氢）获得1934年诺贝尔奖。——译者

[30]伊西多尔·伊萨克·拉比（Isidor Isaac Rabi，1898～1988），生于奥地利的美国物理学家，曾获1944年诺贝尔物理学奖。——译者

[31]尤里乌斯·罗伯特·奥本海默（Julius Robert Oppenheim-er，1902～1967），美国物理学家，他于1942～1945年间在第一颗原子弹的研究过程中，指导了新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯的

实验室工作。——译者

[32]汉斯·贝特（Hans Albrecht Bethe），1906年生于法国的美国物理学家，曾获1967年诺贝尔物理学奖。——译者

[33]爱德华·特勒（Edward Teller），生于1908年，匈牙利裔美籍物理学家，他协助开发了原子弹并提供了氢弹的理论框架。——译者

[34]埃米利奥·塞格雷（Emil Segrè，1905～1989），意大利裔美国物理学家。他因证实了反质子的存在而获1959年诺贝尔奖。——译者

[35]克劳斯·艾米尔·尤利乌斯·富克斯（Klaus Emil Julius Fuchs，1911～1988），出生于德国的物理学家，致力于英美核武器发展的研究，曾因向苏联提供科学机密被监禁。——译者

[36]新墨西哥州首府，位于该州中北部，阿尔伯克基东北方。——译者

[37]恩里科·费米（Enrico Fermi，1901～1954），意大利裔的美国物理学家，因研究中子人工引发原子衰变而获1938年诺贝尔奖，1942年他在芝加哥大学拥挤的球场上第一次实现了受控连锁核反应。——译者

[38]约翰·冯·诺伊曼（John Von Neumann，1903～1957），匈牙利裔美国数学家，他致力于研究过程论和控制论，并有相当贡献。——译者

[39]尼尔斯·亨利克·戴维·玻尔（Niels Henrik David Bohr，1885～1962），丹麦物理学家。因对原子结构和放射的研究获1922年诺贝尔奖。他的儿子亚奇·尼尔斯·玻尔（Aage Niels Bohr，生于1922）也是一个物理学家，因发现原子核的非对称性而获1975年的诺贝尔奖。——译者

[40]古希腊神话中残暴的科林斯国王，被判永远将一块巨石推上海蒂斯的一座小山，而每当接近山顶时，石头又会滚下来。——译者

[41]拉塔克群岛中的一个环状珊瑚岛，位于太平洋中西部的马绍尔群岛，美国1946年和1958年的核试验基地，第一颗氢弹的空中爆炸（1956年5月21日）在此进行。——译者

[42]路易斯·沃尔特·阿尔瓦雷茨（Luis Walter Alvarez，1911～1988），美国物理学家，因其对亚原子粒子的研究而获1968年诺贝尔奖。——译者

[43]美国纽约州首府（自1797年以来），位于纽约州东部哈得孙河西岸，是哈得孙深水航道的起点。1664年英国人控制了17世纪早期建立的荷兰定居地奥兰治要塞，并将其改名为奥尔巴尼。——译者

[44]奥利弗·洛奇（Sir Oliver Joseph Lodge，1851～1940），英国物理学家和作家，以其对无线电报的发展所做出的贡献而知名。他晚年相信超自然现象。——译者

[45]纽约中部偏西南一城市，位于卡尤加河沿岸、锡拉丘兹西南偏南，是康奈尔大学的所在地（1865年特许建立）。——译者

[46]约西亚·威拉德·吉布斯（Josiah Willard Gibbs，1839～1903），美国数学家和物理学家，他系统地阐述了物理化学的基础理论，发展了向量解析并进行光学和热力学的研究。——译者

[47]罗伯特·伍德罗·威尔逊（Robert Woodrow Wilson），生于1936年的美国物理家和辐射天文学家，因研究宇宙微波辐射而获1978年诺贝尔奖。——译者

[48]新泽西州的劳维尔·特林（Lowell C.Thelin）感觉到费曼把那个速度比弄颠倒了——或许是

故意的，为的是刺激读者自己去做这个实验。特林经不住诱惑，为一个旋转的盘子拍了录像，证实盘子转速和徽章转速的比是2比1，刚好和费曼说的相反。实际上费曼没发现这个错误，甚至在稿件校对后都没发现。让费曼焦躁不堪的，是这么一个简单的比值竟然隐藏在这么复杂的运动中。——拉夫·莱顿

[49]美国得克萨斯州的一座城市。——译者

[50]历史上中欧和东欧的犹太人所用的语言，是多种语言的混合，主要来自于中世纪日耳曼方言，其次来自于希伯来语、阿拉姆语和各种斯拉夫语、古法语及古意大利语。——译者

[51]位于加利福尼亚州南部，好莱坞东南不到100千米处，洛杉矶市区的一部分，因其每年的玫瑰花车游行而闻名。——译者

[52]利诺斯·卡尔·鲍林（Linus Carl Pauling），生于1901年的美国化学家，因其在研究化学键性质的成就获1954年诺贝尔奖，1962年又因其在裁军方面所付出的努力而获诺贝尔和平奖。——译者

[53]默里·盖尔曼（Murray Gell Mann），生于1929年的美国物理学家，因其对亚原子粒子的研究获1969年诺贝尔奖。——译者

[54]沃尔特·巴德（Walter Baade，1893~1960），美籍德裔天文学家，他的研究使星际距离的测量更加准确。——译者

[55]汤川秀树（1907~1981），日本物理学家，1949年获得诺贝尔物理学奖。他根据量子力学和力场对基本粒子的影响，从理论上推断了介子的存在。——译者

[56]朝永振一郎（1906~1979），日本物理学家，1965年获得诺贝尔物理学奖。他是量子电动力学的奠基人之一。——译者

[57]弗兰克·劳埃德·莱特（Frank Lloyd Wright，1869~1959），美国建筑师，他基于自然形式的特殊建筑风格极大地影响了现代建筑业。他的设计包括私人住宅，在威斯康星州的拉辛市的约翰逊制腊公司办公大楼（1939年），和纽约的古根海姆博物馆（1943~1959年）。——译者

[58]菲利普·莫利斯公司的创始人，英国商人。他从1847年在伦敦开了一家烟店开始起家。“万宝路”烟就是菲利普·莫利斯公司的品牌。——译者

[59]拉斯·昂萨格（Lars Onsager，1903~1976），挪威出生的美国化学家。他的特别兴趣在于溶液的热力学。由于他的互惠关系定律，即后来所谓热力学零定律，他于1968年获得诺贝尔化学奖。——译者

[60]李政道，1926年出生在上海的美国核物理学家，以其在量子力学方面的研究而知名。他在中国的浙江大学、西南联合大学和美国的芝加哥大学接受教育。他曾在加利福尼亚大学、普林斯顿高等研究院以及哥伦比亚大学任职。他和他的合作者杨振宁以实验的方式证明，在弱核反应中，宇称守恒定律不再正确。为此他们获得了1957年的诺贝尔物理学奖。——译者

[61]杨振宁，1922年出生在安徽合肥的美国理论物理学家，以其对基本粒子的性质和行为的研究而知名。他曾在中国的西南联合大学和美国的芝加哥大学受教育。从1948年到1949年，他在芝加哥大学教授物理学，其间得到邀请，到普林斯顿大学高等研究院做研究。1952年他成为该研究院的终身研究员。1965年他被任命为纽约州立大学阿尔伯特·爱因斯坦教席教授。1957年与合作者李政道获得诺贝尔物理学奖。——译者

[62]吴健雄（1912~1997），生于江苏苏州的美国女实验物理学家。她1936年到伯克利大学进

行研究，以后到了普林斯顿大学和哥伦比亚大学从事研究和教学工作。她最伟大的贡献是否定了宇称守恒定律，同时她也否定了粒子反粒子对称的假设。——译者

[63]美国明尼苏达州东南部一城市，位于圣保罗东南。——译者

[64]美国纽约州中部一城市，位于罗切斯特东南偏东。——译者

[65]欧文·薛定谔（Erwin Schr?dinger，1887～1961），奥地利物理学家，因发现原子理论的新模式而获1933年诺贝尔奖。——译者

[66]保罗·阿德利安·莫里斯·狄拉克（Paul Adrien Maurice Dirac，1902～1984），英国数学和物理学家。1933年因新原子理论公式与薛定谔分享诺贝尔奖。——译者

[67]北卡罗来纳州的首府，位于该州的中东部，达勒姆市的东南。——译者

[68]北卡罗来纳州中北部一城镇，位于罗利西北偏西的彼得蒙边界。——译者

[69]物理学家们说的显然是Gμν，引力物理里一个常用符号。——译者

[70]维尔纳·卡尔·海森堡（Werner Karl1 Heisenberg，1901～1976），德国物理学家，量子力学的奠基人。因其不确定原理而荣获1932年诺贝尔物理学奖。——译者

[71]瑞士精神病学家赫尔曼·罗尔沙赫（Hermann Rorschach）相信，人们在解释墨迹图案的时候，他们的人格特征和潜意识会被揭示出来。心理学家给一个人十张有墨迹图案的卡片，然后要求他描述他看到了什么，然后问他们问题。——译者

[72]加利福尼亚西南，洛杉矶县的一个城市。——译者

[73]让·保罗·格蒂（Jean Paul Getty，1892～1976），美国商业经理，他聚敛了数亿美元资财并在加利福尼亚的马利布建立了一个博物馆（1953年），以公开展出他的大量艺术收藏。——译者

[74]米开海尔·肖洛霍夫（Mikhail Sholokhov，1905～1984），小说《静静的顿河》的作者，苏联作家，曾获1965年诺贝尔文学奖。——译者

[75]1927年出生的意大利的女电影演员、导演和摄影师。我国电影观众熟悉的电影《巴黎圣母院》中的吉卜赛姑娘艾斯米拉达，就是她扮演的。——译者

[76]在我还是康奈尔大学的一个年轻教授的时候，有一年，纽治保尔教授已经来在一个名叫“梅森哲讲座”的系列讲座上讲课了，讲的是巴比伦的数学。讲座很精彩。第二年讲课的是奥本海默。我记得我自己心里想，“有朝一日，要是我能像那样讲课，可太美了！”若干年后，我拒绝许多地方请我去讲课，我却应邀去讲“梅森哲讲座”。我当然不会拒绝，因为那是我的夙愿，因此我接受了邀请，在一个周末到了鲍伯·威尔逊家里，和他讨论了许多想法。讨论的结果，是一个系列讲座，名为“物理定律的本性”。

[77]在我研究汤普逊先生的金星周期修正表的时候，发现他做了一个少有的夸张。他写道，只要看看这个表，你就可以断定玛雅人是怎么计算出金星的正确周期的——用这个数四次，用那个差一次，你就能得出40000年才差一天这样一个精确数，这可真是了不起，特别是由于玛雅人只观察了几百年的时间。汤姆逊碰巧挑了一个数字组合，这个数字组合符合他所认为的正确的金星周期数即583.92。但是，如果你用的是更精确的数字，如583.923，你会发现玛雅人的误差更大。当然，你也可以在表中挑另外一个不同的数字组合以得到583.923，同样了不起的精确！

[78]1965年8月11日到16日，旧金山南部的瓦特区，由警察逮捕一名疑为酒后驾驶的黑人青年

而引起的黑人反失业和反贫困的暴乱。——译者

[79]塞缪尔·约翰逊（Samuel Johnson，1709～1784），英国作家与词典编纂家，作为趣味的仲裁者，他是18世纪的一位重要人物，他的散文风格以有力与匀称而著称。——译者

[80]根据1974年在加州工学院的开学典礼讲话整理。

[81]罗伯特·安德鲁·密立根（Robert Andrews Millikan，1868～1953），美国物理学家，因测量电子电荷而获1923年诺贝尔奖。——译者

[82]费曼在这里玩了一个文字游戏：他用的这个词儿lying在英语里有两个意思，撒谎和躺着，以便和下一句中的“挺直”形成对照，于是我把它勉强翻译为“躺着撒谎”。——译者

SIX EASY PIECES

费曼讲物理：入门

Richard P Feynman

［美］R·P·费曼/著　秦克诚/译

R·P·费曼（1918－1988）出生在纽约市的法洛克维，1942年在普林斯顿大学获得博士学位。在第二次世界大战期间，他对发展原子弹做出过重要贡献。战后费曼曾先后在康奈尔大学和加州理工学院教书。1965年，他因量子电动力学方面的研究荣获诺贝尔物理学奖。除了作为一个物理学家外，费曼在不同时期还曾是故事大王、艺术家、鼓手和密码破译专家。



走近费曼丛书

CS｜湖南科学技术出版社

版权信息

费曼讲物理：入门/（美）R·P·费曼 著；秦克诚 译.——长沙：湖南科学技术出版社，2012.9

（走近费曼丛书）

书名原文：Six Easy Pieces：Essentials of Physics Explained by Its Most Brilliant Teacher

ISBN 978-7-5357-7240-4

I.①费… II.①R……②秦… III.①物理学-普及读物 IV.①O4-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第217539号

Six Easy Pieces：Essentials of Physics Explained by Its Most Brilliant Teacher

Copyright©1994 by Richard P. Feynman and Paul Davies

Chinese（Simplified Characters only）Trade Paperback

Copyright©2012 by Hunan Science & Technology Press

ALL RIGHTS RESERVED

湖南科学技术出版社通过台湾博达著作权代理有限公司获得本书简体中文版中国大陆地区出版发行权，本作品根据美国**Perseus Publishing**公司**1994**年版译出。

著作权登记号：18-2012-006

版权所有 侵权必究

走近费曼丛书

费曼讲物理：入门

著　　者：[美]R·P·费曼

译　　者：秦克诚

责任编辑：吴 炜 陈刚

出版发行：湖南科学技术出版社

社　　址：长沙市湘雅路276号

http：//www. hnstp.com

邮购联系：本社直销科 0731-84375808

印　　刷：湖南天闻新华印务有限公司

（印装质量问题请直接与本厂联系）

厂　　址：湖南望城·湖南出版科技园

邮　　编：410219

出版日期：2012年9月第2版第7次

开　　本：880mm×1230mm 1/32

印　　张：5.5

书　　号：ISBN 978-7-5357-7240-4

定　　价：20.00元

（版权所有·翻印必究）

目录

版权信息
出版者的话
前言
特别序言（选自费曼《物理学讲义》）
费曼的序言 （选自费曼《物理学讲义》）
第一章 运动着的原子
1-1 引言
1-2 物质由原子构成
1-3 原子过程
1-4 化学反应
第二章 基础物理学
2-1 引言
2-2 1920年前的物理学
2-3 量子物理学
2-4 原子核和粒子
第三章 物理学与其他学科的关系
3-1 引言
3-2 化学
3-3 生物学
3-4 天文学
3-5 地质学
3-6 心理学
3-7 它是怎么变成这个样子的
第四章 能量守恒
4-1 什么是能量
4-2 重力势能
4-3 动能
4-4 能量的其他形式
第五章 万有引力理论
5-1 行星运动
5-2 开普勒定律
5-3 动力学的发展
5-4 牛顿引力定律
5-5 万有引力
5-6 卡文迪什实验
5-7 引力是什么
5-8 引力和相对论
第六章 量子行为
6-1 原子力学
6-2 用子弹做的实验
6-3 用波做的实验

6-4 用电子做的实验
6-5 电子波的干涉
6-6 观察电子
6-7 量子力学的基本原理
6-8 不确定原理
理查德·费曼生平



出版者的话

本书的出版，是为了向尽可能广大的读者提供一本内容充实然而仍然是非专业性的物理学入门书，它以费曼的科学工作为基础。我们从费曼著名的里程碑式作品费曼《物理学讲义》（初版于1963年，现在仍是费曼最出名的著作）中选了最容易读的六章。对于一般的读者，幸运的是，费曼选择用不含数学公式的、主要是定性的方式来叙述一些关键题目，这些题目编在一起，就成了本书。

Addison-Wesley出版公司感谢保罗·戴维斯，他为这个新选本写了富有洞察力的前言。在他的前言的后面，我们还从费曼《物理学讲义》里选了两篇序言，一篇是费曼本人的，一篇是他的两位同事的，因为这两篇序言提供了后面六章的来龙去脉，以及对理查德·费曼及其科学工作的深入介绍。

最后，我们得感谢加州理工学院物理系和学院的档案馆，特别是Judith Goodstein博士和Brian Hatfield博士，他们在本书的编选过程中提供了很好的指导和许多建议。

前言

有一个颇为流行的错误观念，以为科学是不具个性的、冷冰冰的、纯客观的事业。尽管人类的大部分其他的活动是受风气、时尚和人的个性支配的，可是人们却认为科学是受公认的程序规则和严格的检验所约束。重要的是科学研究的结果，而不是得出这些结果的人。

这当然是一派胡言。像一切人类奋斗领域一样，科学是由人推动的活动，同样受着风尚和一时的兴致的支配。在这里，风尚不仅表现在对研究题目的选择上，还更多地表现在科学家看待这个世界的方式上。每个时代有其特有的探索科学问题的途径，通常是追随某些杰出人物照亮的道路，这些人既制定了议事日程，也确立了解决列在这个日程上的问题的最佳方法。有时，一些科学家攀登到足够的高度，受到公众瞩目，一个具有杰出素质的科学家就可能成为整个科学界崇拜的偶像。在以往的几个世纪里牛顿就是这样的偶像。牛顿是绅士型科学家的体现——他与权贵有一张关系网，虔信宗教，不慌不忙，做事井井有条。他搞科学的风格在200年中被奉为圭臬。在20世纪的前半个世纪里，爱因斯坦替代牛顿成为大众的科学偶像。行为古怪，不修边幅，德国风度，心不在焉，全神贯注投入工作，一个抽象思想家的原型。爱因斯坦通过对物理学的最基础的概念提出质疑，改变了做物理研究的方式。

理查德·费曼成了20世纪后期物理学的偶像——他是第一个到达这种位置的美国人。费曼于1918年生于纽约，在东岸受教育。他生得太晚，已无缘参加物理学的黄金时代即20世纪的前3个10年用相对论和量子力学改变我们的世界观的革命。这些横扫千军的发展奠定了现今的新物理学大厦的基础。费曼从这些基础出发，帮助建成了新物理学的第一层。他的贡献触及新物理学的几乎每一角落，并且对物理学家思考自然和宇宙的方式有深刻而持久的影响。

费曼是一个优秀的理论物理学家。牛顿既是实验家又是理论家，说不上偏重哪边。爱因斯坦则相当轻视实验，宁肯把他的信念置于纯粹的思维上。费曼从事的是发展一个对自然的深刻的理论理解，但是他总是保持着与现实世界、与常常是乱七八糟的实验结果的紧密联系。曾看过费曼如何把橡胶圈浸到冰水中以解释挑战者号航天飞机灾难事故的人，谁也不会怀疑他既擅长表演又是一个非常实际的思想家。

起初，费曼是以他在亚原子粒子理论方面的工作，特别是由于量子电动力学（其英文缩写为QED）这门学科而赢得声誉的。事实上，量子理论正是从这门学科开始的。1900年，德国物理学家普朗克提出，到那

时为止一直被看成波的电磁辐射，在与实物相互作用时，却又自相矛盾地表现出像能量小包或“量子”那样的行为。这种特殊的量子后来叫做“光子”。在20世纪30年代初之前，新量子力学的建筑师们搞出一个数学方案，来描述带电粒子例如电子对光子的发射和吸收。虽然QED的这种早期表述得到有限的成功，这个理论显然是有缺陷的。在许多情况下对非常确定的物理问题的计算却给出不协调的甚至无穷大的答案。青年费曼在20世纪40年代末，正是将注意力转到建立一个协调一致的QED理论的问题。

为了把QED置于一个坚实的基础上，就必须使这个理论不仅同量子力学的原理协调一致，还得同狭义相对论的原理协调一致。量子力学和相对论各自具有不同的数学机制，具有复杂的方程组，它们的确可以联合或相消以得到量子电动力学的一个令人满意的表述。这样做是一项繁重的任务，需要高度的数学技巧，费曼的同时代人正是沿着这条路做下去的。但是费曼却采取了一条根本不同的路线——这条路线是如此根本和激进，事实上，他不用任何数学就大致能直接写出答案！

为了协助这种非凡的直观技艺，费曼发明了一种以他的名字命名的简单图形系统。费曼图是描绘电子、光子和其他粒子相互作用时所发生的事情的一个很有启发性的简单符号方法。今天费曼图已成为计算的一个常规辅助手段，但是在20世纪50年代初，它们标志着同传统的作理论物理研究方法的令人吃惊的背离。

建立协调一致的量子电动力学理论这个具体问题，尽管是物理学发展史上的一个里程碑，但这仅仅是开始。下面还要界定费曼特定的风格，这种风格在物理学的范围广泛的各个课题中产生出一系列重要成果。对费曼风格的最佳描述是，它是对已有的人类智慧成果的尊崇和不敬的混合。

物理学是一门精确科学，现有的物理学知识虽然不完备，却不可以简单地弃置一边。费曼在很年轻时便对人们已接受的物理学原理有老辣的掌握，并且他选择的研究对象几乎完全是常规的问题。他不是那种在传统约束的死水中、在孤独中苦干偶然碰到深奥的新结果的天才。他的特殊才能是用他特有的方法去研究实质上属于主流方向的问题。这意味着避开现有的形式体系，开辟他自己的高度直观的研究途径。大部分理论物理学家都依靠细心的数学计算作为把他们带进未知领域的导游指南和拐杖，费曼的态度却几乎是一种优雅的骑士风度。他给你的印象是，他能够像读一本书一样读大自然，只是简单地报道他发现的东西，而没有冗长的复杂分析。

的确，在以这种方式追求自己的兴趣时，费曼显示了对严格的形式体系的极度藐视。很难用言辞表达出这样干需要多么高的天赋。理论物理学是一门最难的智力活动，它把蔑视形象思维的抽象概念同极其复杂的数学结合在一起。绝大部分的物理学家只有依靠最高强度的脑力劳动才能得出一些进展。而费曼则对这套严格的行为规则显得驾轻就熟，就

像摘取现成的果子一样从知识之树摘取新成果。

费曼的风格在很大程度上来自他的个性。在他的职业生涯和私生活中，他好像是把这个世界当作一场非常好玩的游戏。物理世界在他面前呈现出一系列迷人的难题和挑战，他的社会环境也一样。他一辈子都是一个爱开玩笑的人，他对权力当局和学术权威，就像他对呆板的数学形式体系一样不尊重。他绝不是一个甘心被愚弄的人，只要他发现现有的规则是专横无理或是愚蠢荒谬的，他就毫不客气地打破它们。他的自传里充满了他在第二次世界大战中如何使原子弹计划的保安人员上当、如何开保险柜、如何用鲁莽无礼的行为解除女士们的戒备的好玩的故事。他对因为在QED方面的工作而授予的诺贝尔奖，也采取了类似的爱要不要的态度。

和费曼这种对拘泥形式的厌恶并行的，是他对稀奇古怪和晦涩难解的东西的迷恋。许多人还记得他对消失已久的中亚国家图瓦[1]的着迷，在他去世前不久还高兴地参与一部有关的纪录片的制作。他在别的方面的热情还包括演奏邦戈鼓、画画、经常出入脱衣舞夜总会和破译玛雅文字。

费曼自己做过不少事来建立他与众不同的形象。虽然懒于动笔，他的谈锋却很健，并且爱讲关于他的各种想法和恶作剧的故事。这些轶事，经过一年一年的积累，增添了他的神秘，并且在他有生之年就使他成了一个人人皆知的传奇人物。他的吸引人的风度使他非常受学生的喜爱，特别是更年轻的那些学生，他们之中许多人把他作为自己的偶像。在费曼因癌症于1988年去世时，他工作了大半辈子的加州理工学院的学生打出了一面旗，上面简单地写着：“我们爱你，迪克。”

正是费曼潇洒的生活态度（一般地）和搞物理的态度（特别地），使他成为这样优秀的一位教师：他很少有时间正式讲课，甚至很少有时间指导他的博士生。但是在合适的情况下他能做非常精彩的讲演，里面充满了智慧的火花、深刻的洞察力和他在其研究工作中表现出来的对传统的不敬。

在20世纪60年代初，人们劝费曼给加州理工学院的一年级和二年级学生开一门物理入门课程。他以他特有的大张声势和他那种没法模仿的不拘礼节、风趣和不落俗套的幽默的混合方式开了这门课。幸运的是，这些无价的讲演用书本形式为后人留了下来。尽管与通常的教材在风格和表述上有很大的不同，他这套物理学讲义是一个巨大的成功，激励和鼓舞了全世界整整一代学生。30年过去了，这套书一点也没有失去它的光彩和明晰。本书是直接从费曼物理学讲义采集来的。编这本书的意图是用费曼物理学讲义这部里程碑式的作品前面不太专门的几章，让一般的读者领略教育家费曼的真实滋味。其结果就是这本令人喜爱的小书——它既可作为非理工科读者的一本物理入门书，也可以作为了解费曼本人的一本入门书。

费曼仔细和精心的讲解给人印象最深的是，他能够用最节约的概念投资和最小量的数学和专门术语，引出影响深远的物理观念。他有窍门能够找到正好的类比或日常的例证，以明白地显示一个深邃的物理学原理的实质，而不被附带的或不相干的细节所模糊。

本书内容的选择并不打算使它成为近代物理学的一个全面的概括，而是要引起读者对费曼的教学方法的兴趣。我们立刻看到的是，他如何能够用新的见解来阐发那些哪怕是老生常谈的题目如力和运动。关键性的概念用取自日常生活或古代的例子来说明。在让读者毋庸置疑地了解哪些是基本理论的同时，又不断地将物理学同别的学科连接起来。

在本书一开始，我们就学到了整个物理学植根于规律的观念——存在着一个有秩序的宇宙，它能够凭理性的推理而被理解。但是，在我们对自然界的直接观察中，物理学的定律并不是透明可见的。它们巧妙地隐藏在我们所研究的现象当中。要揭开隐藏着的有规律的实在上面的面纱，就需要物理学家的秘密武器——仔细设计的实验和数学理论的混合。

最广为人知的物理学定律可能是牛顿关于引力的平方反比定律，在本书的第五章讨论。这个题目是在太阳系和开普勒的行星运动定律的背景下介绍的。但是引力是万有的，横跨宇宙起作用，这使费曼能够用天文学和宇宙学中的例子来为他的讲述增添趣味。在评论了一幅由看不见的力以某种方式结合在一起的球状星团的图景之后，他抒发起感慨来了：“如果有人看不出引力在这里起作用，那他就没有脑子。”

人们还知道别的与自然界的非引力的作用有关的定律，它们描述物质粒子如何相互作用。这些力只有很少几种，费曼本人就因他是历史上少有的几位发现一条物理学新定律的科学家之一而享有盛名，他发现的新定律是关于弱作用力是如何影响某些亚原子粒子的行为的。

高能粒子物理学是战后科学的王冠上的宝石，带着它的那些巨型加速器和似乎没完没了的新发现的亚原子粒子的清单，使人又爱又怕。费曼的研究工作的主要方向是弄清楚这门学问得出的结果的意义。在粒子物理学家中，一个一致的大主题是对称性和守恒定律对建立亚原子粒子园的秩序所起的作用。

粒子物理学家所知道的对称性，刚好也是在经典物理学中已熟悉的对称性。这些对称性中最主要的是由空间和时间的均匀性引起的对称性。以时间为例：除了在宇宙学中大爆炸标志着时间的开始以外，在物理学中没有东西能够区分一个时刻和另一个时刻有什么不同。物理学家说世界“在时间平移中不变”，意思是在你的测量中不论是取半夜还是取正午作为时间的原点，对物理现象的描述不会造成什么区别。物理过程不倚赖于时间的绝对原点。后来知道，这种时间平移下的对称性直接隐含着一条最基本和最有用的物理学定律：能量守恒定律。这条定律说，你可以把能量挪走并且改变它的形式，但是你不能生成它或毁灭它。费

曼用他的淘气鬼丹尼斯的好玩的故事，（这个孩子总是把他的积木藏在他妈妈看不见的地方），把这条定律解释得很透彻（第四章）。

本书中最具挑战性的一章是最后一章，这一章是对量子物理学的解说。毫不夸张地说，量子力学支配着20世纪的物理学，它无疑是现有的最成功的科学理论。它对理解亚原子粒子、原子和原子核、固体的结构、超导性和超流性、金属和半导体的导电性和导热性、恒星的结构以及好多好多别的东西，都是必不可少的。它的实际应用的范围从激光器一直到微芯片。所有这些都来自一个乍一看来（多看几眼也一样）绝对疯狂的理论！量子力学的奠基者之一尼耳斯·玻尔曾说过，如果谁没有受到量子理论的震撼，他就根本不懂得它。

问题在于，量子概念冲击了我们可以称之为常识性实在的核心。特别是，诸如电子或原子这样的物理客体是独立的存在、任何时候都有一组完备的物理属性这个观念出了问题。例如，一个电子不能同时在空间有一个位置又有一个确定的速率。如果你要找一个电子的位置在哪里，你会发现它在某个地方；如果你测量它的速率，你也会得到一个确定的答案。但是你不能同时做这两种观测。在没有一组完备的观察时把位置和速率的确定但未知的值赋予一个电子也是没有意义的。

原子粒子的本性中的这种不可确定性总结在海森伯的著名的不确定原理中。这个原理严格地限制了同时测量位置和速率这样的属性可以达到的精度。位置的一个精确取值使速率的可能值的范围变模糊，反之亦然。在电子、光子和其他粒子的运动方式中都显露出这种量子模糊性。某些实验表明，这些粒子是沿着确定的路径穿过空间的，就像子弹沿着轨道飞向靶子。但是别的实验装置又表明，这些客体的行为也可以像波，表现出典型的衍射和干涉图样。

费曼对著名的“双缝”实验所作的高明分析，把使人震惊的波粒二象性以其最尖锐的形式梳理了出来，至今已成为科学解说史上的经典。他只用很少几个很简单的概念，就把读者带到了量子之谜的核心，并且让我们对它所揭露的实在的矛盾本性啧啧称奇。

虽然量子力学在20世纪30年代初期已经有教科书了，但是，青年费曼宁肯自己把理论改写为一种全新的形式，这是他一贯的典型做法。费曼方法的优点是，它向我们提供了一幅生动的图景，表明大自然的量子诡计是如何运作的。这个方法的想法是，在量子力学中，一个电子穿越空间的路径不是完全确定的。比方说，我们可以想像一个自由运动的电子，它不仅仅是像常识建议的那样沿A、B两点之间的直线运动，而且可以取各种各样曲里拐弯的路径。费曼让我们想象，电子用某种方法探索了一切可能的路径，在没有进行过一次观察以表明电子是取哪一条路径之前，我们必须假设一切可能的路径都会以某种方式对实在作出贡献。因此当一个电子到达空间（比方说靶平面上）一点时，必须把多个不同的历史综合起来以产生这次事件。

费曼的所谓量子力学的路径积分方法或对历史求和方法，把这个卓越的想法加工成一个数学的常规程序。在许多年里，它只是物理学家的一个稀罕的玩物，但是在物理学将量子力学推到登峰造极的地步（把它应用于引力或宇宙学）后，人们发现，费曼方法提供了描述一个量子宇宙的最佳计算工具。历史将会恰当地判定，在费曼对物理学的诸多杰出贡献中，量子力学的路径积分表述是最重要的贡献。

本书中讨论的许多想法带有很深的哲学味道。但是费曼对哲学家有一种根深蒂固的怀疑。一次我曾有机会就数学和物理学定律的本性以及是否能认为抽象的数学定律拥有一种独立的柏拉图式的存在询问过他的看法。他给出了一个非常肯定的和熟练的描述，说明事情何以的确显得如此，但是当我逼着他采取一个具体的哲学立场时，他立刻就后退了。当我试图从他口中引出关于还原论的话头时，他也同样地小心翼翼。按我的事后之见，我相信费曼并不轻视哲学问题。但是，正像他不用系统的数学而能够做出出色的数学物理学工作一样，他也能得出一些出色的哲学见解而不需要系统的哲学。他讨厌的是形式体系，不是内容。

世界不太可能再看到一个里查德·费曼。他在很大的程度上是他的时代之子。费曼的风格只是对正处于巩固一次革命和广泛探索其后果的过程中的学科才工作得令人满意。战后的物理学的基础是牢固的；其理论结构是成熟的，并且为各式各样的应用留有广阔的空间。费曼进入了一个抽象概念的仙境，在其中的许多东西上留下了他个人的思想烙印。这本小书提供了对一个非凡人物的心灵的独特的一瞥。

保罗·戴维斯

1994年9月

特别序言

（选自费曼《物理学讲义》）

在他生命的暮年，理查德·费曼的声望已经超出了科学界的范围。作为调查“挑战者号”航天飞机灾难事故委员会的一员，他的功绩使他广为人知；同样，一本有关他那富于传奇色彩的生涯的畅销书使他成为人们心目中几乎与阿耳伯特·爱因斯坦并驾齐驱的著名人物。不过，哪怕退回到1961年，在他获得诺贝尔奖而在公众中声名大噪之前，费曼也并不仅仅在科学界闻名——他是一个传奇式的人物。他那非凡的教学才能无疑促使其传奇故事广为流传，并增添了神奇的色彩。

他不愧是一个伟大的教师，也许是他那个时代和我们这个时代最出色的。对于费曼来说，演讲大厅就是一个大剧场，演讲的人就是一个演员，既负责提供剧本，也要提供渲染演出效果的焰火以及要传达给听众的事实和数字。他会在讲坛上来回走动，挥动着双手——“理论物理学家与马戏团的杂耍演员两者难以做到的结合，在所有身体动作和声响效果上，”《纽约时报》这样写道。不论他演讲的听众是学生、同事还是公众，那些有幸亲眼目睹费曼演讲的人，对其讲演的感受都是非比寻常的，而且总是难以忘怀的，就像对费曼本人一样。

他是一个喜剧大师，善于吸引各种层面的听众的注意力。许多年前，他讲授过一门高等量子力学课程，这是为加州理工学院的一些在校研究生和该校物理系的大部分教师开设的一门大课。在其中一次讲课中，费曼开始说明如何用图解法表达某些复杂的积分：时间用这根轴表示，空间用那根轴表示，这条直线就用波状线表示，等等。在描述完物理学界熟知的费曼图之后，他转过身来面对着全班学生，诡秘地咧嘴笑道：“这就是那个图！”费曼的演讲结束了，演讲大厅爆发出一阵阵自发的喝彩和掌声。

在完成构成本书内容的讲课之后许多年里，费曼偶尔也给加州理工学院大学一年级学生讲授物理学课程。由他出马自然要保密，只有这样演讲大厅中才有座位留给那些登记选课的学生。在这样一次演讲中，主题是弯曲的时空，费曼表现得特别出色。不过，最令人难忘的时刻却是在演讲开始的时候。当时1987超新星刚刚被发现，费曼对此感到非常兴奋。他说：“第谷·布拉赫有他的超新星，开普勒也有。之后400年间就再也没有过了。可是现在，我也有我的超新星了。”教室里安静下来了，费曼继续说道：“在银河系中有10@11@颗星星。通常，这是一个巨大的数字。但是，这只不过是1000亿而已。它比我国的财政赤字还小呢！我们通常把这些数字叫做天文数字。可现在，我们应该把它们叫做经济学

数字了。”全班情不自禁地大笑起来，而费曼，在抓住了听众之后，继续他的演讲。

除了表演才能之外，费曼的教学技巧并不复杂。我们在加州理工学院档案库保存的文件里找到了说明他的教学理念的一段概括性的话，这是他1952年在巴西时为自己匆忙写下的一张便笺：

“首先要搞清楚你为什么要学生学这个专题，以及你要他们知道哪些东西，至于用什么方法就或多或少由常识给出了。”

费曼所谓的“常识”常常就是完全抓住问题本质的出色技巧。在一次对公众的讲演中，他要解释为什么不可以用提出观念的同一组数据来检验这种观念。似乎是偏离了演讲的主题，费曼开始讨论汽车牌照问题。“你们看，今晚发生了一件最令我吃惊的事情。当时，我正到这里来演讲，我穿过停车场进来了。你们不会相信发生了什么事情。我看到了一辆汽车，车牌是ARW357。你能想象吗？在全国几百万个车牌中，今晚我看到这个特殊车牌的机会有多大？真令人惊奇！”甚至许多科学家也未能掌握的问题，通过费曼那非比寻常的“常识”却弄明白了。

在加州理工学院的35年中（1952～1987），费曼创下了讲授过34门课程的记录。其中25门课程是研究生的高级课程，只限于研究生修读，本科生要修读这些课程需要获得批准（他们常常修读这些课程，因为请求几乎总是获得批准）。其余的课程主要是研究生的入门课程。纯粹为本科生开设的课程，费曼只教过一次，这就是在1961～1962学年和1962～1963学年备受称道的那一次，在1964年又简略地重讲了一次，这次讲课的内容后来就编成了《物理学讲义》。

当时，加州理工学院中有一个共识，那就是大学一、二年级的学生常被头两年必修的物理学课程搞得情绪低落、毫无兴趣，而不是受到激励。为了纠正这种状况，学院要费曼给学生开设一系列覆盖两年时间的讲座，先给一年级的学生讲，接着再给升上二年级的同一班级的学生讲。在得到他同意后，学院很快就决定，将讲课的内容记录下来出版。结果发现，这项工作比人们想象的要困难得多。要将讲课的内容整理成可以出版的讲义，费曼的同事需要做大量的工作，而他本人也一样，要对每一章的内容做最后校订。

课前还得先讲一讲开设这门课程的基本想法和组成部分。由于费曼对要讲什么只有一个不明确的大纲，使这项工作变复杂了。这意味着，只有当费曼站在坐满学生的演讲大厅中讲课时，人们才知道他要讲些什么。然后，学院里协助他工作的教授就会忙着处理像编写课外作业之类的琐碎细节。

费曼为什么要花上两年多的时间改革初等物理学的教学方法呢？人们只能推测其中的原因，不过，基本的原因大概有三个。第一个是他喜欢有一大群听众，这给了他一个比研究生课程中所拥有的更大的剧场；

第二个是他真诚地关爱学生，他朴素地认为，教大学一年级的学生是一件重要的事情；第三个而且可能是最重要的原因是，按照他自己的理解来重整物理学，并把它传授给年轻的学生，这是一项极富挑战性的工作。这是他的特性，是他衡量某件事情是否真正理解了的标准。有一次，学院的一位老师请费曼解释自旋等于1/2的粒子为什么服从费米狄拉克统计。他完美地给这位听众解释了一番，并说道，“我将就这个问题为大学一年级学生开一次讲座。”可是过了几天他回来说，“不行，我干不了这件事。我没法把它简化到大学一年级的水平。这意味着实际上我们并不理解它。”

将艰深的概念化解为简单的、可以理解的词句，这种特色在整部费曼《物理学讲义》中都很明显，但是，表现得最突出的是他对量子力学的讨论。对于那些费曼迷来说，他所做的事情是清楚的。他向刚入门的学生介绍了路径积分方法，这是他发明的用来解决某些最深奥的物理问题的方法。他用路径积分所做的工作，以及其他成就，使他与朱利安·施温格和朝永振一郎一起分享了1965年度的诺贝尔奖。

掀开久远的记忆的面纱，许多参加过讲座的学生和教师都说，与费曼共度物理学课程的两年时光是人生难得的一次经历。不过，当时的情况似乎并不是这样。许多学生害怕进入教室，随着课程的进展，来上课的注册选课的学生人数开始急剧地下降。可是同时，越来越多的教师和研究生开始来听课了。教室一直挤得满满的，费曼也许从来就不知道他正在失去一部分他特意要争取的听众。不过，即使在费曼看来，他在教学方法上的创新尝试也并不成功。1963年他在《物理学讲义》的序言中写道：“我不认为我对学生做得很好。”重读这些讲义，人们有时似乎感到费曼正注视着他的同事而不是他的年轻学生，说道，“看哪！看一看我是如何略施小计解决这个问题的！难道这不是很巧妙吗？”可是，即使他认为他是在给大学一、二年级学生做出浅显易懂的解释，真正能够从他做的事情中获得最大收益的却并不是他们。这个巨大成就的主要受益者是他的同行们——科学家、物理学家和教授，他们透过理查德·费曼那新颖的和富有活力的观点去审视物理学。

费曼不仅是一位伟大的教师。他的才华在于他是教师们的一个出色的老师。如果编写费曼《物理学讲义》的目的只是为挤满一堂的大学本科生解决物理学课程的考试问题，那么，他并不特别成功。而且，如果原来的意图是把这些讲义用做大学的入门教科书，也不能说他实现了目标。尽管如此，这套讲义已经被翻译成10种语言，并且有4种双语版本。费曼本人认为，他对物理学最重要的贡献不是量子电动力学，不是液氦的超流理论，不是极化子模型，也不是部分子模型。他的主要贡献是这三本费曼《物理学讲义》。这个看法表明，出版这几本备受称道的讲义的这个纪念版是完全有道理的。

大卫·L·古德斯坦

格里·纽吉堡尔

1989年4月于加州理工学院

费曼的序言
（选自费曼《物理学讲义》）

这是我去年与前年在加州理工学院给大学一、二年级学生讲授物理学时的讲义。这本讲义当然不是逐字逐句的讲课记录稿——它们或多或少都经过编辑加工。讲课只是构成整个课程的一部分。全班180个学生每周两次聚集在一个大教室中听课，然后分成15～20个学生一组的复习讨论小组由助教进行辅导。此外，每周还有一次实验课。

在这些课程中，我们想要解决的主要问题是，使那些充满热情而且相当聪明的中学毕业后进入加州理工学院的学生仍然保持他们的兴趣。他们早就听许多人说过物理学如何有趣、如何引人入胜了——相对论、量子力学和其他近代概念。但是，当他们学完两年我们以前的那种课程后，许多人就泄气了，因为教给他们的实际上很少有意义重大的、新颖的和现代的观念。要他们学的还是斜面、静电及诸如此类的内容，两年过去了，不免令人相当失望。问题是，我们是否能开设一门课程来顾全那些更优秀、更勤奋的学生，使他们保持求知的热情。

这份讲义完全不是概论性的，而是一门极其严肃认真的课程。我设想这些课程是对班级中最聪明的学生讲的，而且只要有可能，就要确保甚至最聪明的学生也不能完全消化讲课中的所有内容（通过在讲课中提出一些有关的观念和概念在主要线索之外各个方向上的应用）。为此，我试图使所有的陈述尽可能准确，在每种场合都指出有关的公式和概念在整个物理学中占什么地位，以及（随着学习的深入）应该怎样做出修正。我还感到，对于这样的学生，重要的是向他们指出，哪些东西是他们通过对已学过的知识进行演绎就应该能够理解的（如果他们足够聪明的话），哪些东西是作为新东西而引入的。每当新概念出现时，如果这些概念是可以推演出来的，我就尽量把它们推演出来，否则就说明这是一个新概念，它不以任何他们学过的知识为基础，而且认为它是不能证明的——它只是新引进来的。

在课程开始时，我假定学生们在中学毕业时已经知道了某些内容——比如说几何光学、简单的化学概念等。我也看不出有任何理由要按某个确定的顺序来讲授这门课，这个顺序意味着在做好准备详细讨论某个概念之前，我不能提到这个概念。我在讲课中曾经提到过许多将会详细讨论的内容，而提到时并未进行充分的讨论。这些问题的更完整的讨论要等到以后当学生的预备知识更充足时再进行。对电感和能级的讨论就是两个例子，最初只是以非常定性的方式引入这些概念，后来才更全面地展开讨论。

在对准那些更主动的学生的同时，我也希望照顾到另一些学生，对他们来说，这些额外的五花八门的内容和附带的应用只会使他们感到烦恼，也根本不指望他们能听懂讲课中的大部分内容。对这些学生，我希望至少有一个他能够掌握的中心内容或主干材料。即使他并不理解一堂课中的所有内容，我希望他也不要紧张不安。我并不要求他理解所有的内容，只要求他理解核心的和最直接的部分。当然，他也得有一定的水平来领会哪些是主要的定理和概念，哪些是更复杂的枝节问题和实际应用，只有在以后才会理解。

在讲课的过程中遇到了一个严重的困难：没有任何来自学生的反馈信息向我说明讲课的效果究竟如何。这的确是一个很严重的困难，我不知道讲课的效果实际怎样。整件事情实质上是一次实验。如果我真的再讲一次的话，我将不会按同样的方式去讲了——我希望我不必再讲一次！不过我认为，在第一年中这些课程——就物理内容来说——还是相当令人满意的。

在第二年里，我就不那么满意了。课程的第一部分讨论电磁学，我想不出任何真正独特或不同寻常的处理方法——比通常的讲述方式更为引人入胜的任何处理方法，因此，我不认为我在讲授电磁学时做了很多事情。在第二年末，我本来打算继电磁学之后再讲一些物性方面的内容，主要讨论基本模式、扩散方程的解、振动系统、正交函数等问题……逐步阐述通常称为“数学物理方法”的初步内容。现在回想，如果再讲一遍的话，我会回到原来的这个想法上去的。但是，由于没有计划要我再讲一遍这门课，有人就建议，试着介绍一下量子力学可能是个好主意——这就是大家将在第三卷中看到的内容。

很清楚，主修物理学的学生可以等到第三年再学习量子力学。另一方面，有一种意见认为，许多修我们这门课的学生学习物理学只是作为他们在其他领域中的主要兴趣的背景知识。而通常处理量子力学的方法使大多数学生几乎无法利用这门学科，因为他们必须花相当长的时间去学它。然而，在量子力学的实际应用中——特别是在较复杂的应用，如电机工程和化学领域中——整个微分方程的处理方法实际上并没有用到。因此，我试着这样来叙述量子力学的原理，即不要求学生首先熟悉偏微分方程这个数学工具。我想，即使对一个物理学家，由于在讲义本身中可以明显看出的一些原因，按照这种颠倒的方式来介绍量子力学也是一件值得一试的有趣的事。然而，我认为，在量子力学方面的尝试并不完全成功——这主要是因为在最后我实际上已经没有足够的时间了（比方说，我应该再多讲三四次课，以便更完整地讨论诸如能带、概率幅的空间依赖关系等问题）。还有，我过去从未以这种方式讲授过这个专题，因此，反馈信息的缺乏就尤其严重。我现在相信，还是应当迟一些再讲授量子力学。也许有一天我会有机会再来讲授这个专题。那时我会讲好这门课程。

没有编写如何解题的章节是因为另有答疑辅导课。虽然我在第一年中的确讲过三次怎样解题的内容，但并没有把它们编在这本讲义中。在

转动系统这部分内容后面肯定还讲过一次惯性导航问题，可惜它被遗漏了。第五讲和第六讲实际上是由马修·桑德斯讲授的，当时我不在城里。

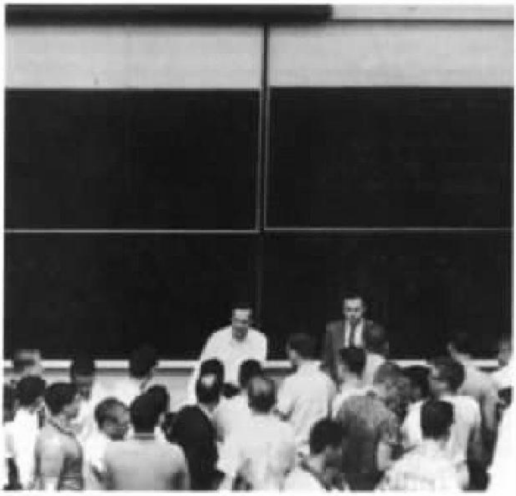
当然，问题是这次试验的效果究竟如何，我个人的看法——不过，与学生一起学习的大部分教师似乎并不同意这种看法——是悲观的。我并不认为我对学生做得很好。当我看到大多数学生在考试中处理问题的方法时，我认为整个这次试验是一次失败。当然，朋友们提醒我，也有那么一二十个学生——非常出人意料地——理解了全部课程中的几乎所有内容，他们还非常积极地阅读有关的材料，兴致勃勃地思考各种问题。我相信，这些学生现在已经具备了第一流的物理学背景知识——他们毕竟是我想要培养的那种学生。不过，正如吉本[2]所说，“教育的威力是难得见成效的，除非教者与被教者双方是理想的组合，然而这时教育又几乎是多余的了。”

尽管如此，我并不希望让任何一个学生完全落在后面，虽然也许曾经发生过这样的事。我认为，我们能够更好地帮助学生的一个办法就是，多花一些精力去编写一套能够说明讲课中某些概念的习题集。习题提供了一个充实讲课内容的良好机会，使已经讲过的概念更实际、更完整而且记得更牢。

然而，我认为，除非我们认识到，只有当一个学生和一个优秀的教师之间建立起个人的直接联系的情况下——这时学生可以讨论概念、思考问题和讨论问题——才能达到最好的教学效果，否则没有任何办法解决教育中的这个问题。只是坐着听课，做指定的习题，是不可能学到很多东西的。不过，在现在这个时代，我们有这么多学生要教育，因此，我们不得不试着寻找某种代替理想情况的方法。也许我的讲义能够做出一些贡献。也许在某些小地方有个别的教师和学生会从讲义中得到一些启示或者想法。也许他们乐于透彻地思考讲义的内容——或者进一步发展其中的一些想法。

理查德·P·费曼

1963年6月



第一章　运动着的原子

1-1　引言

这门两学年的物理课程，是从你，亲爱的读者，将成为一位物理学家的角度出发而开设的。当然，事情并不一定如此，但是没有哪门课的哪位教授不是这么想的！如果你要成为一个物理学家，你有大量的东西得学：这可是一个200年来发展得极其迅速的知识领域。要学的知识这么多，事实上，你会以为，在四年里也学不完；的确也学不完，你还得上研究生院接着学！

令人非常惊奇的是，尽管在这段时期里物理学家做了极其大量的工作，却有可能把这大量的成果大大地浓缩——这就是说，找出概括我们全部知识的定律。尽管如此，这些定律也是难以掌握的，因此，在你出发对这个庞大的领域进行探索之前，应当给你一幅地图或对科学的这一部门与那一部门的关系的大致了解。根据这个想法，本书的前三章将概述物理学与其他科学的关系、各门学科之间的相互联系以及科学的意义，以帮助我们对本学科找到一种“感觉”。

也许你会问，为什么我们不能这样教物理呢：一开始就列出基本定律，然后就一切可能的情况说明这些定律如何起作用，就像我们在欧几里得几何中所做的那样？在欧几里得几何中，先陈述公理，然后演绎出各种结论。（这样，如果你对用四年学习物理学不满意，你想在四分钟里学完它？）我们不能这样做，这有两个原因。首先，我们还不知道所有的基本定律：未知领域的前沿还在不断地扩张。其次，物理定律的正确陈述涉及一些很陌生的概念，而描述这些概念要用高等数学。因此，即使是要了解术语的涵义，也得经过一段相当长的预备性训练。因此，是不能这样做的。我们只能一点一点来。

大自然整体的每一片断或部分，始终只是对完整的真理（或迄今我们所认识的完整真理）的逼近。事实上，我们知道的每件事物都只是某种近似，因为我们知道我们至今还不知道所有的定律。因此，我们之所以要学习一些东西，正是为了以后再放弃它，或者，更恰当地说，再改正它。

科学的原则（或简直可以说是科学的定义）是，实验是一切知识的检验者。实验是判断科学“真理”的惟一标准。但是知识的源泉又是什么呢？要检验的各个定律来自何处？实验本身有助于产生这些定律，因为实验给我们以提示。但是，要从这些提示概括出一般化的准则，猜测隐藏在它们下面的奇妙、简单而又陌生的图像，然后再做实验来再次检验我们猜得对不对，还需要有想像力。这个想象过程非常不容易，使得物

理学中产生了分工：有一些理论物理学家，他们只管想象、推导和猜测新的物理定律，但是不做实验；还有一些实验物理学家，他们做实验、想象、推演而且猜测。

我们说过，自然定律是近似的：我们先发现“错”的定律，然后再发现“对”的定律。那么，一个实验怎么会“错”呢？首先，一个不值一说的原因是，仪器出了什么毛病，而你没有注意到。但是这类问题是容易查出的，可以反复核对。因此不要纠缠在这样的小问题上，那么，一次实验的结果怎么能错呢？只能是由于不精确。例如，一个物体的质量似乎永远是不变的：一个陀螺旋转和静止时一样重。于是一条“定律”便出台了：质量是个常量，与速率无关。现在发现，这条“定律”是不正确的。质量是随速度的增大而增大的，但是要质量有明显的增大，则要求速度接近于光速。正确的定律是：如果一个物体以小于每秒一百多千米的速率运动，其质量在百万分之一的精度内是不变的。在某种这样的近似形式下，这是一条正确的定律。因此可能会认为，新定律在实际中并不引起重大的差别。事情可能是这样，也可能不是这样。对于通常的速率，我们肯定可以不管新定律，而使用简单的质量守恒定律作为一个良好的近似。但是在高速情况下我们就错了，速率越高，错得越厉害。

最后并且最有趣的是，从哲学角度看，我们用近似定律是完全错了。即使质量只变化一点点，我们关于世界的整幅图景也不得不改变。这是关于定律后面的哲学或观念的一个非常特殊之点。即使一个非常小的效应，有时也要求我们的观念做深刻的变化。

那么，我们该先教什么呢？是先教正确但不熟悉的定律及其陌生而困难的概念，比方相对论、四维时空等，还是先教简单的“质量守恒”定律，它仅是近似的，但不包含这些困难的概念？前者更引人入胜，更奇妙，更有趣，而后者一开始更容易接受，它是真正理解前一种定律所包含的概念的第一步。在物理教学中这个问题会一再发生。在不同的时候我们将以不同的方法解决这个问题，但是在每一阶段都值得弄清楚的是，现在已经知道什么，它的精确度多高，它同别的各种事物的关系如何，当我们学得更多以后它会有什么改变。

现在，让我们按照我们对今日科学（特别是物理学，但也包括其外缘的其他学科）的理解的基本轮廓（即我们总的地图）继续前进，这样，当我们以后专注于某个具体的问题时，我们就能对它的背景有一些了解：为什么这个具体问题是有趣的，它在整体结构中的位置如何。那么，我们的世界总体图景是什么呢？

1-2　物质由原子构成

如果在某次大灾难中，所有的科学知识都将被毁灭，只有一句话能够传给下一代人，那么，怎样的说法能够以最少的词汇包含最多的信息呢？我相信那就是原子假说（或原子事实，或随便你叫它什么名字），即万物都由原子构成，原子是一些小粒子，它们永不停息地四下运动，当它们分开一个小距离时彼此吸引，而被挤到一堆时则相互排斥。只要稍微想一想，你就会看到，在这句话里包含关于这个世界的极大量的信息。

为了表明原子观念的威力，假设我们有半厘米大小的一滴水。让我们非常贴近地观察它，我们看到的只有水——光滑的、连续的水。即使我们用现有的最好的光学显微镜（大致放大2000倍左右）来放大这滴水，把它放大到10米大小——大约有一个大房间这么大，仍然非常贴近地观察它，我们将仍旧看到相当光滑的水，不过有一些小的、足球形状的东西在里面游来游去。非常好玩。这些东西是草履虫。你可能就此打住，对草履虫及其扭动的纤毛和卷曲的身体感到好奇，除了把草履虫放得更大看看它的内部之外不再往下看了。当然，这是生物学的一个题目，但是眼下让我们跳过它，继续更贴近地观察水这种物质本身，把它再放大2000倍。现在这滴水已经有20千米大了，如果我们非常贴近地看，就会看到某种挤在一堆的东西，它们不再有光滑的外表了，看起来像是从很远的距离外看到的足球比赛时场上的一堆人。为了看清这种挤在一堆的东西究竟是什么，我们再把它放大250倍，就会看到与图1-1中所示相似的某种东西。这个图是放大了10亿倍的水滴图，不过在几个方面理想化了。首先，各个粒子用简单的方式画成具有明确的边缘，这是不精确的。其次，为了简单起见，把它们画成几乎是按照一定的图式做二维排列，而实际上它们当然是在三维空间中四下运动。注意图中有两种“小斑”或圆，分别代表氧原子（黑色）和氢原子（白色），并且每个氧原子有两个氢原子和它连在一起（一个氧原子和它的两个氢原子组成的小组叫做一个分子）。图中还有一个被理想化的地方是，自然界中的真实粒子是不断地振动着、跳来跳去、相互缠绕在一起、彼此互绕着旋转。因此你必须把这幅画面想象成动态的而不是静止的。另外一件没法在图里画出的事实是，粒子是“粘在一起”的：它们互相吸引，那一个拉着这一个，等等。可以说，整个一群都“胶合在一起”。另一方面，这些粒子也不是相互挤压。如果你试图把两个粒子挤得太靠近，它们就互相推开。

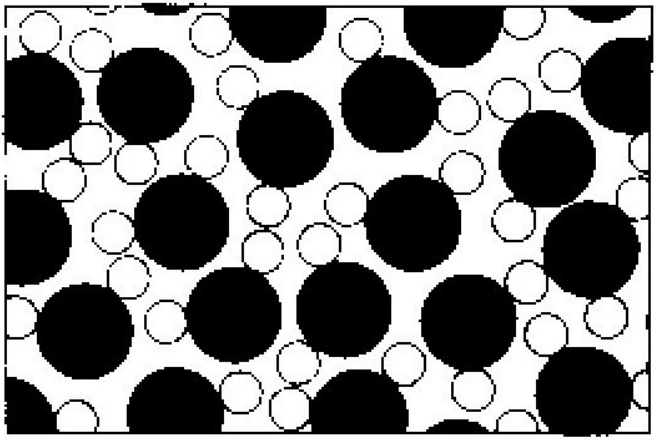


图1-1　放大10亿倍的水滴

原子的半径为1到2×10^{-8}cm。10^{-8}cm现在叫做1Å（这仅是另一个名称而已），因此我们说它们的半径是1Å到2Å。另一个记住原子大小的方法是：如果把一个苹果放大到地球那么大，那么苹果里的原子就近似是原来的苹果那么大。

现在想象这个大水滴，连同它的所有那些粘在一起、一个挨着一个、振动着的分子。水保持着它的体积；它不会散开，因为它的分子互相吸引。如果水滴是在一个光滑的斜面上，那么水会流走，但是它不会消失，分子不会飞走，因为它们之间有吸引力。分子的这种振动运动就是我们所说的热：当温度升高，这种运动也加强了。如果我们加热水，这种振动也增强，原子之间的体积也增大。如果继续加热，到了分子间的吸引力不足以把它们拉在一起时，分子就会飞走，互相分离。当然，这正是我们生成水蒸气的方法——升高温度；粒子由于运动增强了而飞走。

图1-2是一幅蒸汽的图像。这幅蒸汽图像有一个缺陷：在通常的气压下，整个房间里只可能有不多的水分子，在这幅图大小的区域里（指放大10亿倍之前）肯定不会有多至三个分子。大部分这么大的方形区域里一个分子也没有——但是我们碰巧在这张图里有两个半或三个分子（这样这张图才不会完全空白）。于是，在蒸汽的情况下，我们比在水的情况下更清楚地看到了水分子的特征。为简单起见，把水分子画成具有120°的夹角。实际上这个夹角为105°3′，氢原子中心与氧原子中心的距离为0.957Å，因此我们对这个分子已了解得很清楚了。

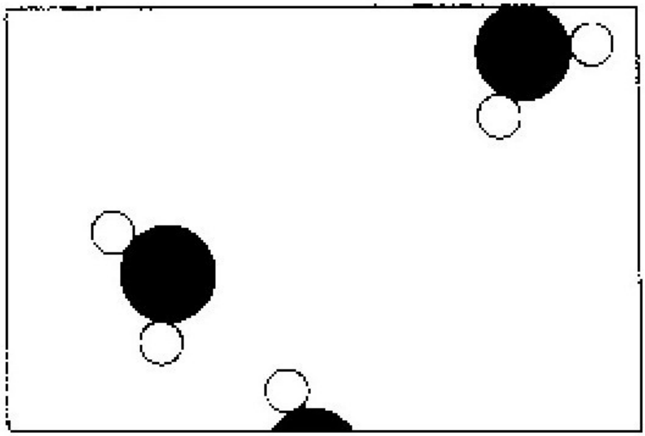


图1-2　水蒸气

我们来看看蒸汽或任何其他气体有些什么性质。这些气体分子是彼此分开的，他们会撞击墙壁并反弹回来。想象一个房间里有不少网球（成百个）不停地来回弹跳。当它们撞击墙壁时，就把墙壁向外推（当然我们必须把墙推回去）。这意味着，气体施加一个躁动不安的力，而我们粗糙的感官（我们自己并没有被放大10亿倍）只感到它的平均推力。为了把气体限制在一个范围内，我们必须施加一个压力。图1-3表示一个盛放气体的标准容器（这幅图用在所有的教科书中），一个带活塞的汽缸。因为水分子的形状在这里并不重要，为简单起见，我们把它画成网球或小黑点。它们不停地沿所有的方向运动。有这么多分子一直不断地撞击顶部的活塞，因此，为了使活塞不被这种不断的撞击从罐子里顶出来，我们就必须施加一个力把活塞压下去，这个力叫做压力（实际上，这个力等于压强乘面积）。显然，这个力和面积成正比，因为如果我们增大面积而保持每立方厘米内的分子数不变，那么分子与活塞碰撞的次数与活塞的面积按同样的比率增加。

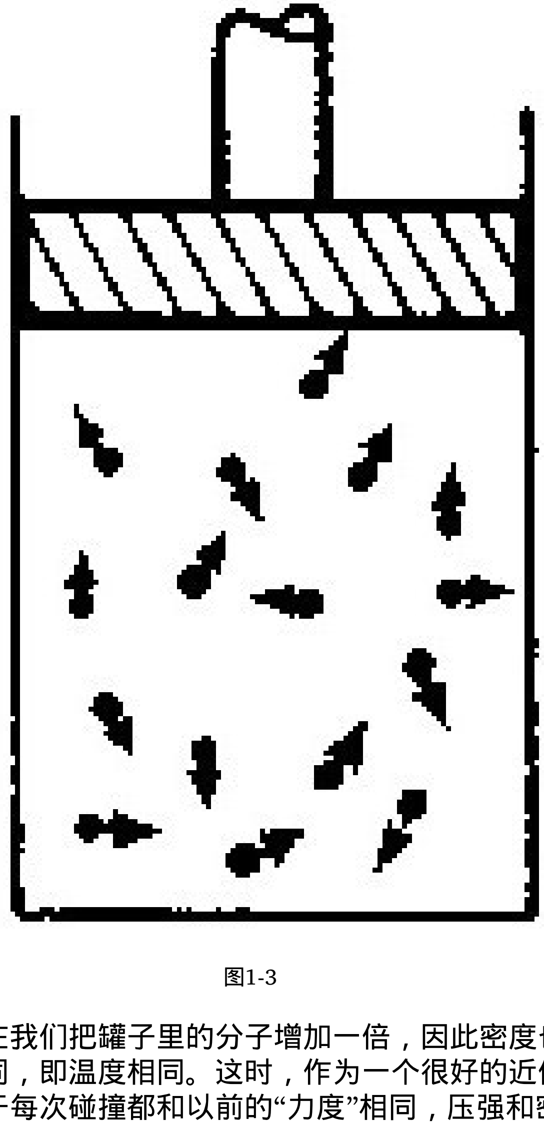


图1-3

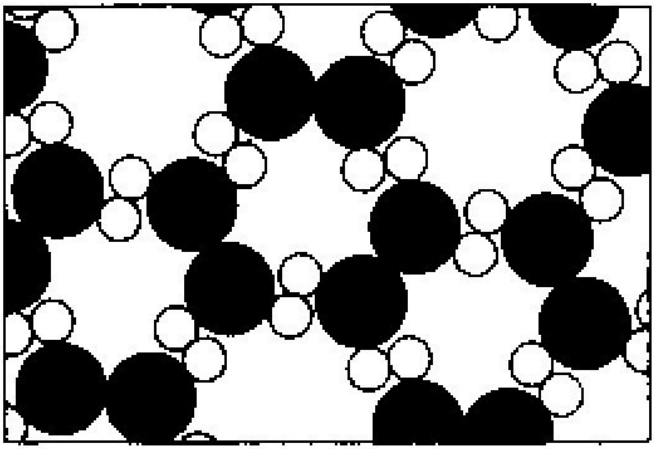
现在我们把罐子里的分子增加一倍，因此密度也加倍，而分子的速率则相同，即温度相同。这时，作为一个很好的近似，碰撞次数也将加倍，由于每次碰撞都和以前的“力度”相同，压强和密度成正比。如果我们考虑原子之间的力的真实性质，那么由于原子之间的吸引，我们预期压强会略有减少，而由于原子也占有有限的体积，预期的压强又会略微增大。无论如何，作为一个良好的近似，如果密度足够低，原子数目不多，压强和密度成正比。

我们还可以看看别的情况：如果我们增高温度而不改变气体的密度，即，如果我们增大原子的速率，那么压强会发生什么变化呢？这时，由于原子运动得更快，它们撞击得更有力了，同时撞击得也更频繁了，因此压强增大。你瞧，原子理论的概念多么简单！

我们来考虑另一种情形。假定活塞向内运动，于是原子被缓慢地压

缩到一个更小的空间里。当一个原子撞到一个运动的活塞时，会发生什么情况？显然，原子将从碰撞获得速率。你可以试一试：例如，乒乓球从一块向前运动的球拍上弹回，你会发现，弹回的速率比打到球拍上的速率更大。（一个特例是，如果一个原子刚好静止不动而活塞撞上它，它一定动起来。）于是原子离开活塞时要比它们撞上活塞之前更“热”。因此容器中的所有原子的速率都将增大。这意味着，当我们缓慢地压缩气体时，气体的温度会升高。于是，气体在被缓慢压缩时温度升高，在缓慢膨胀时温度降低。

现在回过头来看我们的水滴，向另一个方向上看。假设我们降低水滴的温度，使水里的原子、分子的振动逐渐减弱。我们知道，原子之间是有吸引力的，因此过了一会儿，它们就不会振动得像原来那么欢了。图1-4表示的是在很低的温度下将发生的情况：分子被锁定在一种新的型式中，这就是冰。这幅具体的关于冰的图像是不正确的，因为它是二维的；但是它在定性上是正确的。有趣之点是，它的每一个原子都有确定的位置。你很容易想象，如果我们用某种方法使冰滴一端的原子排成一定的型式，每个原子都处于一个确定的位置，那么由于互相连结的结构是刚性的，在几千米之外（在我们放大的比例尺下）的另一端也会有确定的位置。因此，如果我们拿住一根冰针的一端，它的另一端就会抵抗我们想把它掰开的努力，不像水那样，水由于振动增强，使其中的原子都以各种方式四下运动，结构就破坏了。固体和液体的差别就在于，固体中的原子是按照某种阵列排列的，叫做晶体阵列，即使在长距离上它们的位置也不是随便的；晶体一端的原子的位置由晶体另一端的别的原子的位置确定，哪怕它们之间相隔几百万个原子。图1-4是一幅虚构的冰的阵列图，它不是冰的真实排列情况，虽然它包含了冰的许多正确的特征。正确特征之一是，图中有一种六角形对称性。你可以看到，如果把画面绕一根垂直轴转120°，它将回复原状。因此，冰里存在有一种对称性，这说明了雪花的六边形外貌。从图1-4可以看出的另一件事是，为什么冰融化时体积会缩小。图中示出的冰的具体的结晶图样中有许多“孔”，真实的冰的结构也是这样的。当这种组织瓦解时，这些空可以被分子占据。绝大多数简单物质，除水和活字合金外，都在熔化时膨胀，因为在固态晶体中，原子是密集堆积的，熔化时需要更大的空间供原子活动，但是一个张开的结构则会塌缩，像水的情形。



冰

图1-4

虽然冰具有一种“刚性”的结晶形态，它的温度还是可以变化的——冰也有热量。如果我们愿意，可以改变冰的热量。对冰的情况，热量的涵义是什么？冰的原子并不是静止不动的，它们在振动着。虽然晶体中有确定的秩序——确定的结构，所有的原子仍在“原地”振动。随着我们提高温度，它们振动的幅度越来越大，直到把它们自己从所在的位置上摇下来。我们把这叫做熔化。随着我们降低温度，振动越来越弱，直到绝对零度时原子还有一个最低限度的振动，而不是完全不动。原子的这种最低的振动不足以使物质熔化，只有一个例外，那就是氦。随着温度降低，氦原子的运动尽可能地减弱，但即使在绝对零度下也仍然有足够的运动使之不凝固。除非把压力加得足够大，使原子挤到一堆，氦在绝对零度也不凝固。如果加大压力，可以使它凝固。

1-3　原子过程

从原子的角度来描述不同的物态就讨论到这里。但是，原子假说也能描述过程，因此，我们现在从原子的观点来考察一些过程。第一个要考察的是与水的表面相联系的过程。在水的表面上会发生什么情况？设想水的表面上是空气，我们使图像变得更复杂——也更现实。图1-5表示这种情况。我们看到和以前一样的水分子，它们构成液体的水，不过现在我们也看到水的表面。在表面上方，我们发现一些东西：首先有水分子，像在蒸汽中那样。这就是水蒸气，他们总是存在于水的上方。（在水和水蒸气之间有一种平衡，我们将在以后讨论。）此外我们还发现一些别的分子——这里是两个氧原子自己结合在一起，组成一个氧分子；那里是两个氮原子也结合在一起，组成一个氮分子。空气几乎完全由氮、氧和一些水蒸气组成，此外还含有更少量的二氧化碳、氩气和其他东西。在水面上方的是含有一些水蒸气的空气。那么，在这幅画面中正发生什么事呢？水里的分子不停地振动着。时不时，水面上的一个分子受到比平常厉害一些的撞击，被撞出去了。在图中难以看出所发生的事，因为这幅画面是静态的。但是我们可以想象表面附近的一个分子刚刚被撞击，飞了出去，或者也许另外一个分子也被撞击飞出去。于是，一个分子接着一个分子，水就消失了——蒸发了。但是如果把容器盖上，过一会儿我们就会发现空气分子中有大量的水分子。时不时地，有一个水蒸气分子飞到水里，再次结合在一起。因此我们看到，这件呆板、无趣的事——一杯盖上盖子的水，摆在这里也许20年了——实际上却包含着动态的、有趣的现象，无时无刻不在进行。就我们这双肉眼而言，没看见发生任何变化，但是如果能够放大10亿倍来看，我们就会看到，从它自己的视角来看它是在不断地变化：一些分子飞出去，一些分子飞回来。

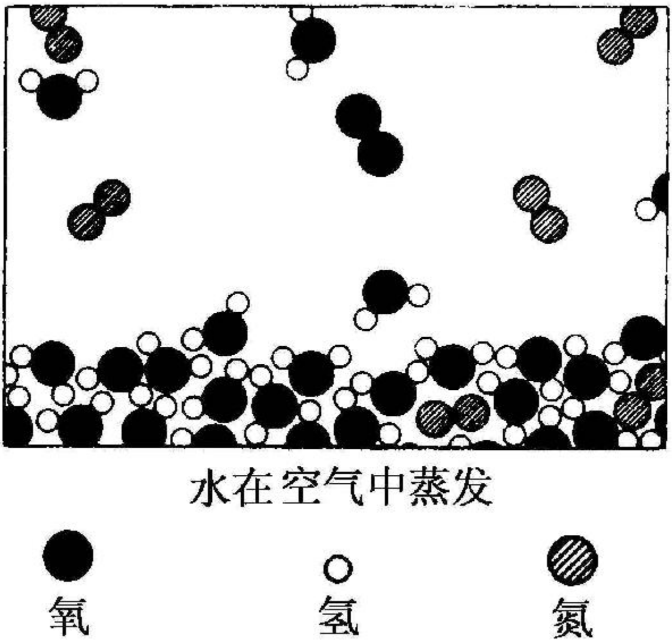


图1-5

为什么我们看不出变化呢？因为离开的分子和飞回来的分子的数目正好一样！从长期来看“什么也没有发生”。如果现在我们把容器的盖子打开，吹走湿空气而以干燥的空气代替，那么离开的分子数目还和以前一样，因为它只依赖于水分子的振动，但是飞回来的分子数则大大减少，因为水面上方的水分子少了很多。因此出去的比进来的多，水就蒸发了。所以，如果你要让水蒸发，就打开风扇！

现在讨论另一个问题：哪些分子会离开？一个分子能够离开水面，是由于它偶然积累了比平常多一点的能量，使它能够摆脱邻近分子的吸引。这样，由于离开的分子带走的能量多于平均能量，留下的分子的运动平均起来就比原来要弱。因此液体蒸发时就逐渐变冷。当然，如果一个水蒸气分子从空气进入下面的水中，当分子靠近水面时，会突然受到一个很强的吸引。这使进来的分子的速率加大，结果产生热量。因此分子离开时带走热量；返回时产生热量。当然，如果没有净蒸发，就什么结果也不发生——水的温度不改变。如果我们在水面上吹风，使蒸发的分子数一直占优势，水就会凉下来。因此，要使汤凉就得不停地吹！

当然你应该认识到，刚才说的这个过程要比我们指出的更复杂。不只是水分子进入空气，时不时也有氧分子或氮分子进入水里，“迷失”在大量的水分子中。这样空气就溶解在水里，氧分子和氮分子尽力挤入水中，而水里将含有空气。如果我们突然从容器中抽走空气，那么空气分子从水里出来就要比进去更快，这样就产生了气泡。你可能已知道，这对潜水员是不好的。

现在我们讨论另一个过程。在图1-6中，我们从原子的角度来看固体在水里溶解的过程。如果我们把一块食盐晶体丢进水中，会发生什么事呢？食盐是固体，是晶体，是“食盐原子”的一种有组织的排列。图1-7是普通的食盐（氯化钠）的三维结构图。严格说来，晶体不是由原子构成，而是由所谓离子构成的。离子是一个带有几个额外的电子或失去几个电子的原子。在食盐晶体中，我们找到的是氯离子（带有一个额外电子的氯原子）和钠离子（少一个电子的钠原子）。离子在固体食盐中由电吸引力结合在一起，但是把它们丢到水里后，我们发现，由于带负电的氧和带正电的氢对离子的吸引，有些离子便松开了。在图1-6中我们看到有一个氯离子松开了，而别的原子仍以离子的形式浮在水中。这幅图是颇为细心绘制的。例如，你可以注意到，水分子的氢原子一端比较倾向于靠近氯离子，而氧原子一端则多数靠近钠离子，这是因为钠离子带正电，水分子的氧端带负电，它们之间有电吸引力。从这幅图我们能够看出是盐正在溶解到水中还是从水中结晶出来吗？当然不能，因为正当某些原子离开晶体时，别的原子又重新回到晶体上。这是一个动态过程，和蒸发过程一样；它取决于水中的食盐是多于还是少于维持平衡所需的数量。所谓平衡指的是这样的情况，这时原子离开的比率和返回的比率相同。如果水中几乎没有盐，离开的原子就比返回的原子多，盐就溶解；反之，如果水中的“食盐原子”太多，返回的原子多于离开的，盐就结晶。

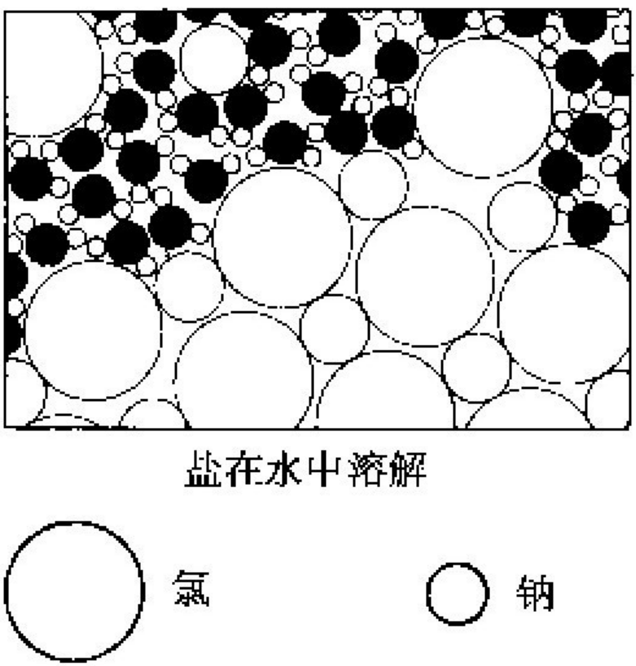
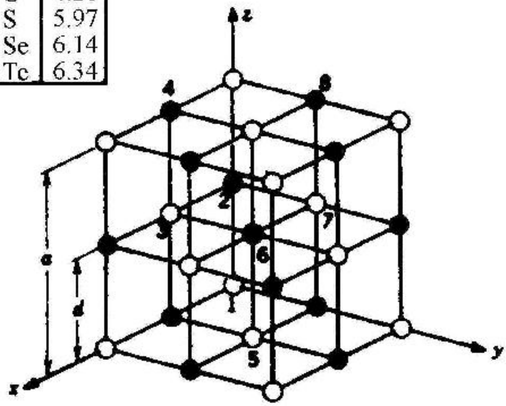


图1-6

晶体	●	○	$a(\text{Å})$
岩盐	Na	Cl	5.64
钾钠盐	K	Cl	6.28
	Ag	Cl	5.54
	Mg	O	4.20
方铅矿	Pb	S	5.97
	Pb	Se	6.14
	Pb	Te	6.34



最近邻距离 $d=a/2$

图1-7

顺便说一句，一种物质的分子这个概念只是近似的，只对某些种类的物质才有意义。在水的情况下，很清楚，三个原子确实结合在一起。在固体氯化钠的情况，就不那么清楚了。在氯化钠中，钠离子和氯离子仅仅按立方格子的图样排列，并没有把它们分成“食盐分子”的自然方式。

回到我们对溶解和沉淀的讨论上来。如果升高食盐溶液的温度，那么离开晶体的原子的比率会增加，但同时返回晶体的原子的比率也增加。结果就很难一般地预言过程向哪个方向进行，固体是溶解得更多一些呢还是更少一些。随着温度升高，大部分物质溶解得更多，但是有些物质溶解得更少。

1-4　化学反应

在我们迄今讨论过的所有过程中，原子和离子都没有变换过伙伴，但是当然存在有这样的情形，原子改变其组合关系，形成新的分子。图1-8画的就是这种情况。一个过程中，如果发生了原子伙伴关系的重新安排，我们就称之为化学反应。迄今讨论过的其他过程叫做物理过程，但是二者并没有截然的界限。（大自然母亲并不在乎我们怎么称呼这些过程，她只是在不停地产生这些过程。）图1-8要表示的是碳在氧气中的燃烧。对于氧气，两个氧原子紧紧地结合在一起。（为什么不是三个甚至四个结合在一起呢？这是这类原子过程的很独特的特性之一。原子是很特别的：它们喜欢某些特定的伙伴，某些特定的方向，等等。物理学的任务就是要分析每个原子为什么想要它所要的东西。不论怎样，两个氧原子满足而且乐意地构成一个分子。）

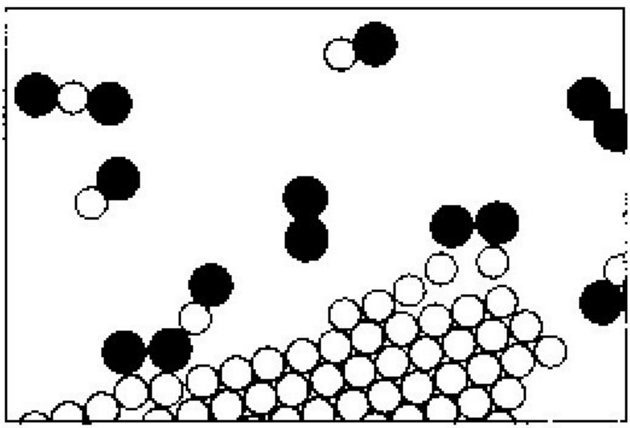


图1-8　碳在氧中燃烧

假设碳原子是在一块固态晶体中（可以是石墨或金刚石[3]）。现在，比方，有一个氧分子跑到碳这边来，每个氧原子可以结识一个碳原子，然后双双以一种新的组合形式——碳-氧（Carbon-Oxygen）组合——飞走，这是一种气体分子，叫做一氧化碳，给它一个化学符号CO。这很简单：两个字母“CO”实际上是这个分子的一幅画像。但是碳吸引氧要比氧吸引氧或碳吸引碳强得多。因此，在这个过程中，氧原子来时可以只携带很少的能量，但是氧和碳却疯狂地啮合在一起，引起巨大的骚乱，近旁的每件东西都从它那里得到能量。于是就产生了大量的分子运动的能量——分子的动能。当然，这就是燃烧；我们从氧和碳的结合中得到热量。热量通常以热气体的分子运动的形式存在，但在有些情形下，热量大到足以发光。火焰就是这样产生的。

而且，一氧化碳并不怎么感到满足。它还有能力再抓住一个氧原子，因此我们可以有一个更复杂得多的氧和碳化合的反应，在氧和碳结

合时，同时又碰巧和一个一氧化碳分子相撞。一个氧原子可以把自己结合到一个CO分子上，最终形成一个新分子，它由一个碳原子和两个氧原子组成，用CO_2表示，叫做二氧化碳。如果我们在一个氧气稀少的快速反应中燃烧碳，就会生产相当数量的一氧化碳（例如在汽车发动机中，那里的爆燃快得来不及生成二氧化碳）。在许多这类化学反应中，释放出大量的能量，形成爆炸、火焰等，因不同的反应而不同。化学家研究了原子的这种重新排列，并且发现每种物质都是原子的某种排列。

为了说明这个观念，我们来考虑另一个例子。如果我们走进一个紫罗兰花圃，我们知道紫罗兰的香味。它是某种分子或原子的排列，钻进了我们的鼻子。首先，它们是怎么钻进我们的鼻子的？这很简单。如果气味是空气中的某种分子，四处乱飞并不断受到撞击，它就有可能偶然钻进我们的鼻子。它当然并没有特别的愿望想要进入我们的鼻子。它只不过是挤成一堆的分子中的一部分，在漫无目的的游荡中偶然跑到我们的鼻子里来了。

化学家可以把诸如紫罗兰的香味这样的具体的分子拿来，对它们进行分析，告诉我们这些原子在空间的精确排列。我们知道二氧化碳分子是直的而且对称：O-C-O[4]（这容易用物理方法确定）。即使对化学中那些极其复杂的原子排列，人们通过长期的、卓有成效的探索工作，也探明了它们的排列方式。图1-9是紫罗兰附近的空气图；我们再次看到空气中有氮气和氧气，还有水蒸气（为什么有水蒸气？因为紫罗兰是湿的。所有的植物都有蒸腾作用）。但是，我们还看到一个由碳原子、氢原子和氧原子组成的“怪物”，它具有某种特殊的排列方式。这种排列方式比二氧化碳的复杂得多；事实上，这是一种极其复杂的排列。可惜，我们不能把所有已经确实知道的有关它的化学知识都画出来，因为全部原子的精确排列实际上是在三维空间里，而我们的图仅是二维的。六个碳原子组成的环不是平的，而是一种“皱起来”的环。它的所有角度和距离都已知道。因此一个化学式只不过是这样一个分子的一幅画像。当一个化学家把一个化学式写在黑板上时，可以说他是试图在二维空间里“画”这个分子。例如，我们看到六个碳原子组成一个“环”，尾巴上挂着一条碳“链”，在链的倒数第二个碳上原子有一个氧原子，三个氢原子接在碳原子上，还有两个碳原子和三个氢原子粘在一起，等等（图1-10）。

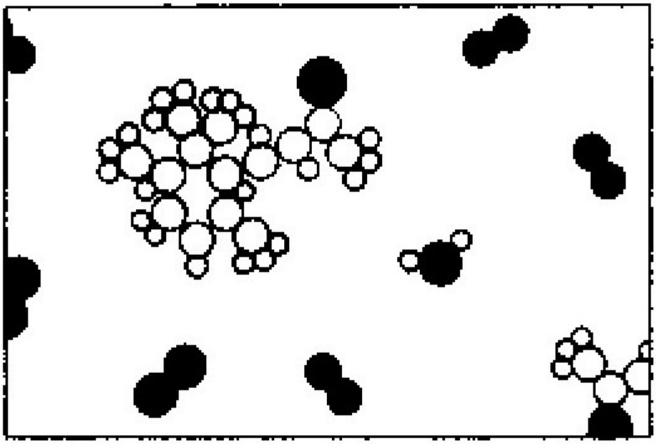


图1-9　空气中的紫罗兰分子

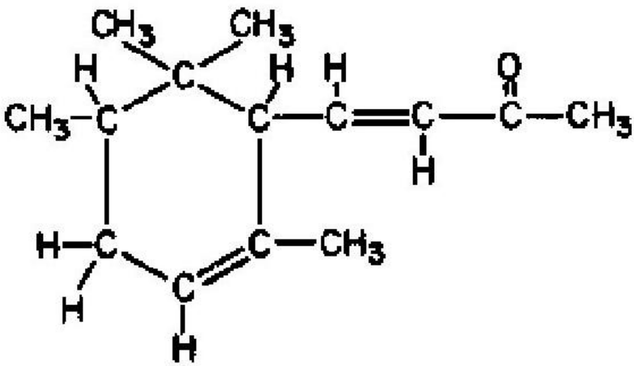


图1-10　α鸢尾酮的结构图

化学家是怎样发现这些排列的呢？他把几瓶东西倒在一起，如果它变红色，就说明它是由在某处连在一起的一个氢原子和两个碳原子组成的；反之，如果变蓝色，就完全不是这么回事。这是曾经做过的最神的侦测工作之一——有机化学。为了发现这些极其复杂的阵列中原子的排列方式，化学家观察两种物质混合时发生的情况。物理学家从来就不太相信，化学家在描述原子的排列时真正了解他们谈论的内容。大约20年前，在某些情况下，能够用一种物理方法来观察这些分子了（没有这个分子这么复杂，而只包含它的某些部分），能够确定每个原子的位置，不是通过观察颜色，而是通过真正测量原子的所在。可是，你瞧！化学家几乎总是对的。

实际上，现在知道，紫罗兰的香味中有三种略有不同的分子，它们的差别仅在于氢原子的排列不同。

化学中的一个问题是为一种物质命名，使人们一见名字就知道它是什么东西。为这种物质取个名字看！这个名字不仅得告诉我们它的分子

的形状，还必须告诉我们这里有一个氧原子，那里有一个氢原子——告诉我们每个原子的确切种类和位置。因此可以想象，为了求全，化学名称一定是很复杂的。你看！这个东西的比较完整的名称是4（2，2，3，6四甲基5环己烯基）3丁烯2酮，它不仅告诉你这种东西的结构，还告诉你这是它的排列方式。我们可以理解化学家的难处，理解他们取这样长的名字自有其理由。并不是化学家有意把事情搞得晦涩难懂，而是他们在试图用词语来描述分子时遇到很大的困难！

我们怎么知道存在着原子？是用前面说过的一种策略：先假设原子存在，然后一个接着一个结果都和我们的预言相符合，如果万物真是由原子构成的话，它们就应当如此。还有更直接一些的证据，其中一个很好的例子如下：原子小得连用光学显微镜也看不见它们——事实上，用电子显微镜也看不见。（用光学显微镜只能看见大得多的东西。）但是，既然原子是在不停地运动（比方说在水中），那么，如果把一个由某种东西做的大球放进水中，这个球比原子大得多，它就会四处乱动——就像在一场推球游戏中一个大球被许多人四下乱推一样。人们向不同的方向推球，而球就在场上无规律地四处乱滚。同样，“大球”也会因为它在各个侧面所受的碰撞不相等、在不同时刻所受的碰撞也不相等而运动。因此，如果我们用一个很好的显微镜观察水中很小的粒子（胶体微粒），我们就会看到一幅粒子不停地乱动的画面，它是许多原子撞击的结果。这叫做布朗运动。

在晶体结构中，我们可以看到关于原子存在的进一步的证据。在许多情形下，由X射线分析推断出的结构与自然界中的晶体实际显示的形状在空间型式上相符合。一块晶体的各个“晶面”之间的夹角，同假设一块晶体是由许多“层”原子构成而推断出的夹角，符合到角秒的量级。

万物都由原子构成。这是最基本的假设。例如，在整个生物学中，一个最重要的假说是，动物做的每一件事都是原子做的。换句话说，生物所做的事，没有一件不能从认为生物是由遵循物理定律而相互作用的原子构成的观点来理解。这并不是一开始就清楚的，经过一些实验和推理之后才提出这个假说；但是现在它已被人们接受，并且是在生物学领域内提出各种新观念的最有用的理论。

如果由一个原子挨着一个原子所组成的一块钢或一块食盐能够具有那样有趣的一些性质；如果水——从涓埃细滴到地球上的江河海洋——能形成波浪和泡沫，在它冲向水泥堤岸时咆哮着，掀起狂澜；如果所有这些，如果潺潺流水的全部生动，都只不过是一堆原子，那么，它们另外还能够产生多少有趣的现象呢？如果不是把原子排列成某种确定的型式，再三重复，继续不停，甚至形成一些像紫罗兰的香味一样的复杂的小东西，而是做出处处都不相同的排列，用不同种类的原子，按照多种方式，不断变化，绝不重复，那么，这样构成的东西的行为又将会多么神奇？在你面前走来走去并且和你谈话的那个“东西”，就是这样一大堆排列得非常复杂的原子，这可能吗？它的极度复杂性会改变你对它的能力的想法吗？当我们说我们是一堆原子时，我们的意思并不是我们只是

一堆原子，因为一堆并非简单地一个一个重复的原子完全可以具有极为丰富而生动的可能性，只要你站在一面镜子前，就可以在镜子里看到这一点。



第二章　基础物理学

2-1　引言

在这一章里，我们要考察我们对物理学的最基本的观念，也就是我们当前所了解的事物本性。我们将不讨论我们是怎样知道这些观念都是正确的这一认识过程；在适当的时候你们会学到这些细节。

我们在科学中关心的事物有千变万化的形式和多种多样的属性。比方，如果我们站在海边眺望大海，我们会看到海水、浪花飞溅、泡沫、波涛汹涌，还有涛声、风和云、太阳和蓝天以及光线；海边有沙粒及不同硬度、年代、颜色和纹理的岩石。海里有动物和海草，饥饿和病痛；海滩上有游人，甚至还有幸福和思考。自然界的其他地方，也有类似的事物和效应的多样性，不论在哪里，都像这里一样复杂多样。好奇心使我们提出问题，使我们试图把事物综合起来，试图把这种多样性理解为或许是由比较少的基元事物和作用力以无穷多种方式组合而引起的。

例如：沙粒和岩石是两种东西吗？也就是说，也许沙粒只不过是大量的很小的石块？如果我们了解岩石，是不是也了解了沙粒和月亮？风是不是空气的流动，就和海里的水流相似？不同的运动有哪些共同的特性？有多少种不同的颜色？等等。用这种方式，我们试图逐步分析万事万物，把乍看之下很不相同的事物综合在一起，希望能够减少不同类事物的数目，从而更好地理解它们。

几百年前，人们提出了一种方法，来寻求这些问题的部分答案。这套方法由观察、推理和实验构成，我们称之为科学方法。我们将只限于对所谓基础物理学的基本观点，或由应用科学方法而产生的基本观念做一描述。

我们所谓的“理解”某一事物，究竟是什么意思呢？我们可以把组成这个“世界”的这些运动事物的复杂组合，想象成天神们下的一盘巨大的象棋[5]，而我们是这局棋的观众。我们不知道弈棋的规则，允许我们做的就是观看这场棋赛。当然，如果我们看的时间够长，我们终归能看出几条规则来。这些弈棋规则就是我们所说的基础物理学。但是，即使我们知道每一条规则，我们也可能不懂在棋赛中为什么要走具体某一步棋，这仅仅是因为情况太复杂而我们的智力是有限的。如果你会下棋就一定知道，学会所有的规则是容易的，而要选择最佳的走法或理解人家为什么这么走则往往很难。在自然界中也是如此，只是程度更厉害，但我们至少能够发现所有的规则。实际上，今天我们还不知道所有的规则。（比方，偶尔发生的“王车易位”我们就还不懂。）除了我们还不知道全部规则之外，用已知的规则我们确实能解释的事物也是非常有限

的，因为几乎所有的情况都极其复杂，我们不能用这些规则领会这盘棋的走法，更不用说预言下一步将发生什么情况了。因此，我们只能满足于弈棋规则这个比较基本的问题。如果我们知道了规则，就认为我们“理解”了世界。

如果我们不能透彻地分析这局棋，那么又怎么判别我们“猜”出来的这些规则实际上是否正确呢？大致有三个办法。第一，可能有这样的情况，大自然安排得（或我们把大自然安排得）比较简单，组成部分很少，从而我们能够精确预言将要发生的事，于是可以检验我们的规则工作得好不好。（在棋盘的一个角落，可能只有不多几个棋子在走，于是我们可以精确地推算出。）

第二个检验规则的好办法，是通过由那些已知规则推导出来的更一般性的规则来检验那些规则自身。例如，国际象棋中象在棋盘上移动的规则是只许走对角线。由此可推出，无论走多少步，开始时在红方格里的象将永远在红方格里。这样，即使我们不能弄懂细节，我们总可以通过查明它是否总是在红方格里来检验我们关于象的走法规则的概念。在一段长时间里，它当然都会在红方格里，直到我们突然发现它在黑方格里了（当然，这时发生的是这个象被俘获了，另一个卒子攻至底线升级为象，红方格里的象就成为黑方格里的象[6]）。物理学中的情况正是这样。在一段长时间里，我们有一条总的说来工作得很好的规则，尽管我们不清楚它的细节；然后在某个时候我们可能发现一条新规则。从基础物理的角度来看，最有趣的现象当然是那些新情况，那些老规则不适用的情况，而不是老规则适用的情况！这是我们发现新规则的途径。

第三种判别我们的观念是否正确的办法比较粗糙，但可能是三种方法中最有力的，那就是粗略近似的方法。我们可能说不出为什么阿廖欣[7]要走具体的这一步棋，但是我们也许多少能大致看出，他正在把他的棋子调集到王的周围来保护它，因为这是在这种情况下该做的明智的事。同样，我们常常可以用这种理解棋局的方法来多多少少理解自然，虽然我们不能看出它的每一步是在做什么。

我们首先把自然现象粗略地分成几类，如热、电、力学、磁学、物性、化学现象、光学、X射线、原子核物理、引力、介子等。但是，其目的是把完整的自然界看成一组现象的不同侧面。这就是今天基础理论物理学面临的问题：发现实验后面的定律，把不同的门类统一起来。历史上，我们曾多次实现过这种统一，但是随着时间的推移，又有新的事实发现。我们曾统一得非常好，但是突然又冒出了X射线。随后我们统一了更多的事实，然而又发现了介子。因此，在弈棋的任何一个阶段，棋局都显得相当混乱。大量的事实被统一了，但是总是有一些线索向一切方向伸出来。这就是今天的现状，我们试图在下面加以描绘。

历史上的一些进行统一的例子如下。首先，是热学和力学的统一。当原子在运动时，运动越剧烈，系统包含的热量就越多，因此，热和所有的温度效应可以用力学定律来说明。另一次极大规模的统一是发现了

电、磁和光之间的关系，弄清楚了它们是同一事物即我们今天所称的电磁场的不同侧面。另一次统一是化学现象（各种物质的各种性质）和原子的行为的统一，这发生在量子化学中。

现在的问题显然是，这种统一能不能继续进行下去，直至把万事万物都统一在一起，并且发现这个世界仅仅是一种事物的不同侧面？没人知道它的答案。我们只知道，这样做下去时，我们发现可以把一些事实统一进来，但是随后又发现一些不能纳入这个统一方案的事实，我们就继续玩这种拼图游戏。拼图的基元单位的数目是否有限，或拼图是否有个边界，都还是未知之数。除非有那么一天能拼成这个图，否则我们永远不会知道这些问题的答案。现在我们要做的是，看看这个用最少的原理来理解各种基本现象的统一过程进行到什么程度了，现况如何。简单地说就是，事物是由什么构成的？有多少种基本元素？

2-2　1920年前的物理学

一下子就从现代的观点开始讨论是有些困难的，因此我们先看一下，在1920年前后事物看起来是什么样子，然后再从这幅图像中挑出几件东西来讲。1920年前，我们的世界图像大致是这样的：宇宙活动的舞台是欧几里得几何描绘的三维空间，事物在叫做时间的媒质中变化。舞台上的基本元素是粒子，例如原子，它们具有若干属性。头一个属性是惯性：如果一个粒子在运动，它将继续沿同一方向运动下去，除非它受到力的作用。于是第二个基本元素就是力，当时以为有两种：第一种力是一种极其复杂、细致的相互作用力，它以复杂的方式将各种原子结合在不同的组合中，它决定了温度升高时食盐是溶解得快些还是慢些。另一种当时已知的力是一种长程相互作用，一种变化平缓的、悄悄的吸引力，与距离的平方成反比变化，叫做万有引力。引力定律很简单，当时已为人们所知。至于为什么运动的物体会保持运动下去，为什么存在万有引力定律，当然当时还不清楚。

这里我们关心的是对自然的描述。按照原子论的观点，气体和实际上一切物质，都是大量运动着的粒子。这样，我们站在海边看见的许多事物立即就可以联系起来。首先是压强，它来自原子与器壁或别的什么东西的碰撞。原子的移动如果平均而言沿着一个方向运动，那就是风；而无规的内部运动则是热。过多的粒子积聚在一起使密度超过平均值，它们将成堆的粒子不断向外散开，这就生成了波，这种过剩密度的波就是声音。能够理解这么多的事物，这是一个重大的成就。这些事物我们在上一章里已经讲过一些。

粒子的种类有多少？当时认为有92种，因为最终发现有92种不同的原子。它们有不同的名称，不同的化学性质。

下一个问题是，短程力是什么？为什么碳原子会吸引一个或者也许两个氧原子而不是三个氧原子？原子间的相互作用的机制是什么？它是万有引力吗？不是。万有引力太弱了。但是想象一种力，它与万有引力相似，也随距离的平方成反比变化，但强得多，并且有一个重要差别：在万有引力下一切物体都相互吸引，但现在想象存在有两类“东西”，这种新力（当然它就是电力）具有同类相斥、异类相吸的性质。携带这样强的相互作用的“东西”叫做电荷。

那么，我们会得到些什么结果呢？假设我们有两个相异的、相互吸引的电荷，一正一负，紧紧地贴在一起。假设另外还有一个电荷，离它们若干距离。这个电荷会感到任何吸引吗？它实际上不会感受到任何作用，因为如果前两个电荷大小相等，那么一个的吸引和另一个的排斥会抵消。因此在任何可观的距离上的力都很小。但是，如果我们使第三个电荷与前两个非常靠近，就会产生吸引，因为同号电荷的排斥和异号电荷的吸引会使异号电荷更靠近些，并使同号电荷远离。这样排斥力就将

小于吸引力。这就是由正电荷和负电荷组成的原子，在它们相隔一个可观的距离时，相互作用的力很小（除万有引力外）的原因。当它们靠近时，它们就能够互相“看到内部”，重新安排它们的电荷，结果它们之间就产生了很强的相互作用。原子之间的相互作用的终极原因是电的作用。由于这个力是如此之大，一切正电荷和一切负电荷通常会结合成一个尽可能紧密的组合。万事万物，包括我们自己，都是由极细微的、强烈地相互作用着的带正电和带负电的粒子组成，正电荷和负电荷相互抵消。偶尔，我们可以从一件东西上擦下来一点点带正电的粒子或带负电的粒子（通常擦下带负电的粒子比较容易些），这时电力不再抵消，我们就会看到电的吸引作用。

电力比万有引力到底强多少呢？考虑两粒沙子，大小为1毫米，距离30米。如果它们之间的力不被抵消，也就是说，如果所有的电荷都互相吸引而不是同号电荷相斥，因此没有抵消，那么，它们之间的力有多大呢？有300万吨！你瞧，正电荷或负电荷的数目只要超过或不足很少一点点，就足以产生可观的电效应了。当然，这就是你（用非电学方法）看不出带电物体和不带电物体的差别的原因——涉及的粒子数目如此之少，它们很难对一个物体的重量或大小造成什么差别。

有了这幅图像，原子就比较容易理解了。人们设想在原子的中心有一个“原子核”，它带正电并且有很大的质量，周围环绕着一定数目的“电子”，电子很轻并且带负电。现在我们稍微超前一点，预先指出原子核本身也包含两种粒子：质子和中子，它们的质量几乎相同，非常重。质子带电而中子不带电。如果我们有一个原子，它的原子核里有6个质子，外面环绕着6个电子（通常的物质世界中的负电粒子都是电子，它们比组成原子核的质子和中子轻得多）。这是元素周期表中的第6号元素（或者说其原子序为6），叫做碳。第8号元素叫做氧，等等。因为化学性质取决于核外的电子，并且事实上只取决于那里有多少个电子。因此，一种物质的化学性质完全取决于一个数，电子的个数。（化学家的全部元素清单实际上可以用编号1，2，3，4，5，……来表示，我们可以不说“碳”而说“第6号元素”，意味着它有6个电子。但是当然，当元素初发现时，并不知道它可以用这种方式编号，而且这还会使事物看起来相当复杂。让这些元素各自有自己的名称和符号，这比用数字来称呼一切东西要更好一些。）

关于电力还有更多的发现。电相互作用的一个自然的解释是，两个物体简单地互相吸引，正的吸引负的。但是，后来发现，用这个概念来表示电相互作用并不恰当。对电相互作用的一个更恰当的表示是，正电荷的存在在某种意义上扭曲了空间的“状态”，或在空间产生了一种新“状态”，使得我们把一个负电荷放进来时它会感受到一个力。这个产生力的潜在可能性叫做电场。把一个电子放进电场，它就会受到一个“拉力”。于是我们就得到两条规则：（1）电荷产生一个电场，（2）电场中的电荷会受到力的作用而运动。讨论下述现象，用电场来表示电作用的理由就更清楚了。如果我们使一个物体比如一把梳子带电，然后把一张带电的纸放在离梳子一段距离外。前后移动梳子，纸片会有反应，总是指向

梳子。如果把梳子摇动得更快，就会发现纸片的运动要落后一些，即作用有所滞后。（在第一个阶段，当我们相当慢地移动梳子时，我们还看到一种并发症，那就是磁。做相对运动的电荷必定有磁作用，因此磁力和电力实际上可以归结为一个场，就像同一事物的两个不同的侧面。一个变化的电场不可能离开磁场而存在。）如果我们把带电的纸片移到更远的地方，滞后就更大。这时观察到一件有趣的事：虽然两个带电物体之间的力应当与距离的平方成反比变化，但却发现，当我们摇动一个电荷时，其影响伸展的范围要比我们乍看之下所猜想的远得多。这就是说，这个效应下降得比平方反比律慢。

这里有一个类比：如果我们在一个水池里，近旁有一个漂浮的软木塞。用另一个软木塞划水，可以直接使前一个软木塞运动。如果你只注意看两个软木塞，你将会看到一个的运动是对另一个的运动的立即响应——两个软木塞之间有某种“相互作用”。当然，实际上我们所做的是搅动水，然后水再去扰动另一个软木塞。我们可以建立一条“定律”：如果轻轻地划动水，水里邻近的物体就会运动。当然，如果第二个软木塞离得更远，它就几乎不动，因为我们只是局部地搅动水。反之，如果我们使软木塞上下运动，就发生一种新现象，水的运动带动了周围的水，形成了向外传播的波，因此通过上下运动，就有一种影响范围大得多的效应，波的效应，它无法从直接相互作用的观点理解。因此直接相互作用的观念必须代之以通过水发生作用的观念，或者在电的情况下，代之以所谓的电磁场。

电磁场能够传送范围广泛的波；其中的一部分是光波，别的则用在无线电广播中，它们总的名字是电磁波。这些振荡的波可以有各种频率。一种波与另一种波的惟一真正的差别就在于振荡的频率。如果我们把一个电荷摇动得越来越快，看它产生的效应，我们将得到整整一系列不同的效应，它们由一个数，即每秒钟的振荡次数，统一在一起。建筑物墙上的电线中的电流产生的“干扰信号”的频率大约是每秒100周左右。如果我们把频率增加到每秒500千周或1000千周（1千周＝1000周），那就是无线电广播所用的频率范围。（英文中“正在广播”是ontheair，当然广播和空气（air）毫无关系！没有任何空气在真空中也可以进行无线电广播。）如果我们再度提高频率，我们就进入了调频广播和电视所用的波段。频率进一步增高就是短波，例如雷达用的波。频率再高，就不需要仪器来“看”这些波了，我们可以用肉眼来看。在$5\times10^{14}\sim5\times10^{15}$周/秒的频率范围内，我们的眼睛能够看见带电梳子的振荡，只要我们能够把梳子摇得这么快。我们将看到红光、蓝光或紫光，依它们的频率而定。低于这个范围的频率叫做红外光，高于这个范围的叫紫外光。从一个物理学家的观点看，我们能够看见特定频率范围内的波这一事实，并不使这一段电磁波谱比别的波段更特别，但是从一个人的观点看，当然这个波段更令人感兴趣。如果频率再高，我们就得到X射线。X射线不是别的，只不过是频率很高的光。频率再高，就得到γ射线。X射线和γ射线这两个名称，几乎是当作同义语来使用。通常把从原子核发出的电磁波射线叫做γ射线，而从原子发出的高能电磁波则叫做X射线，但是不论它们起源在哪里，当它们的频率相同时，它们在

物理上是无法分别的。频率更高的波，比方说10^{24}周/秒，我们可以人工生成，比方用我们加州理工学院的同步加速器。在宇宙线中，我们可以发现频率极高的波，其振荡频率甚至更快1000倍。这些波我们还不能控制。

表2-1电磁波谱

频率（周/秒）	名　称	大致行为
10^{2}	电干扰	场
$5\times10^{5}\sim10^{6}$	无线电广播	波
10^{8}	调频—电视	波
10^{10}	雷达	波
$5\times10^{14}\sim10^{15}$	光	波
10^{18}	X射线	粒子
10^{21}	γ射线（原子核）	粒子
10^{24}	γ射线（“人工”）	粒子
10^{27}	γ射线（宇宙线中）	粒子

2-3　量子物理学

在描述了电磁场的概念和了解电磁场能够传送波之后，我们很快就知道，这些波的行为实际上十分奇特，很不像一个波。在比较高的频率上它们的行为更像是粒子！正是在1920年后发现的量子力学解释了这种奇特的行为。在1920年前的那几年，爱因斯坦已经改变了把空间看作三维空间、把时间看作与空间分离的单独存在的图像，首先是把空间和时间组合在一起，叫做时空，然后更进一步用弯曲的时空表示万有引力。于是，宇宙的舞台就变为时空，而引力则可认为是时空的一种改变。然后又发现，关于微小粒子运动的法则是不正确的，在原子世界里，“惯性”和“力”的力学法则——牛顿定律是错的。相反，人们发现，小尺度上事物的行为与大尺度上的事物毫无相似之处。这给物理学带来了困难，也带来了饶有兴趣的挑战。之所以说是困难的，因为事物在小尺度上的行为方式是如此“违背常理”；我们对它没有任何直接经验。这里事物的行事方式与我们已知的任何事物都不相像，因此除了解析方法外，用任何别的方法来描述这种习性是不可能的。它是困难的，得有丰富的想像力。

量子力学中有许多新想法。首先，它不再允许一个粒子既有确定的位置又有确定的速度；它认为这个观念是错误的。为了表明经典物理学怎么错了，看下面的例子。量子力学中有一条定则是，不可能同时既知道一样东西在什么地方，又知道它运动得多快。动量的不确定量和位置的不确定量是互补的，二者的乘积是常数。我们可以把这条定律写成$\Delta x\Delta p\geq h/2\pi$，后面会对它做更详细的说明。这条定则解释了下面这个非常神秘的佯谬：如果原子是由正电荷和负电荷组成的，它们相互吸引，那么为什么负电荷不是干脆掉到正电荷上，彼此完全抵消呢？为什么原子有这么大？为什么原子核稳坐中央而电子环绕着它？开始曾以为，原子核就有这么大；但是不然，原子核非常小。一个原子的直径大约有10^{-8}cm，原子核的直径只有约10^{-13}cm。如果我们有一个原子并希望看到原子核，那么我们必须把原子放大到一间大房子那么大，这时原子核才刚刚是可以用眼睛分辨出来的一个小斑点，但是几乎原子的全部重量都集中在这个无比小的原子核上。是什么原因使电子不掉进去呢？就是上面这条定理：如果电子都掉进原子核，我们就知道它们的精确位置，于是不确定原理就要求它们具有一个非常大（但是不确定）的动量，也就是一个很大的动能。有了这个能量，电子就将摆脱原子核。于是它们达成一个妥协：电子为这种不确定性给自己留下一点空间，同时按照这条定则以最小的运动量振动着。（记得我们前面说过，当一块晶体冷却到绝对零度，它的原子并不停止运动，仍然在振动。为什么？因为如果原子停止振动，我们就会知道它们的精确位置同时知道它们的运动速度为零，而这是违反不确定原理的。我们不能同时知道它们的位置和它们运动的速度，因此它们必须在那里不断地扭动。）

量子力学带来的另一个科学观念和科学哲学上的最为有趣的变化

是：在任何情况下都不可能精确预言将会发生的事情。例如，我们有可能使一个原子处于准备发光的状态，也能够通过探测光子来测量一个原子已经发光（这很快就会讲到）。但是，我们无法预言它将在什么时候发光，或者在有几个原子的情况下，哪个原子会发光。你也许会说这是因为有某种内部的机制在起作用，这种内部机制我们还没有足够靠近地观察过。不，没有什么内部机制，按照我们今天的理解，大自然的行事方式是，从根本上就不可能精确预言在给定的一个实验中究竟会发生什么事。这是一种很糟糕的事；事实上，哲学家以前曾说过，科学的基本要求之一就是，只要有相同的条件，就一定会发生相同的事。这并不正确，它不是科学的一个基本要求。事实上，并不发生相同的事，我们能得到的只是所发生的事的一个统计平均。不过，科学并没有因此而完全崩溃。顺便说一句，哲学家对科学绝不可少的条件说过很多，但是人们看到，他们说的都相当天真，有时甚至是错的。例如，这个或那个哲学家说，科学工作的一个基本要求是，如果在一个地方，比方说斯德哥尔摩，做一个实验，然后在另一个地方比方说基多[8]做同一个实验，一定会得到同样的结果。这完全是错的。科学并不必然是这样；这可能是一个经验事实，但是并不必然如此。例如，如果一个实验是观察天空，那么在斯德哥尔摩会看到北极光，而在基多却看不到；这两个结果就不同。"但是"，你说，"这件事与室外的情况有关；你能把自己关在斯德哥尔摩的一间黑房子里，把窗帘拉下来，这样也能找到什么区别吗？"肯定能。如果我们把一个摆挂在一个万向节上，把它拉起一个角度，再放开它，那么摆就会几乎在一个平面内摆动，但是不严格在一个平面内。在斯德哥尔摩，摆动平面会慢慢转动，而在基多则不会。在基多窗帘也是拉下来的。这件事的发生并没有带来科学的毁灭。科学的基本假设、它的基本哲学到底是什么？我们在第一章就说过，实验是检验任何观念的正确性的惟一标准。如果发现大多数实验在基多给出的结果和在斯德哥尔摩做出的结果一样，那么这些"大多数实验"就会用来抽象出某个普遍定律，而对那些结果不同的实验，我们就会说这是由斯德哥尔摩附近的环境引起的。我们将会发明某种方法来概括实验的结果，而不必让人家事先告诉我们这种方法是怎样的。如果有人告诉我们，同样的实验总是产生同样的结果，那很好；但是如果我们试过之后发现并不是这样，那就不是这样。我们仅仅必须接受我们所看见的，然后通过我们的实际经验来形成我们其他的观念。

再回到量子力学和基础物理学上来。当然，现在我们还不能详细讲述量子力学原理，因为它们不容易懂。我们将假定已经有了这些原理，然后讲讲它们的某些结果。结果之一是，我们习惯于视为波的事物也具有粒子的习性，而粒子也具有波的习性。事实上万事万物的行为都是这样，不存在波和粒子的区分。因此量子力学把场及其波的概念和粒子的概念统一起来，成为一个统一体。的确，当频率低时，现象的场的一面更明显，或者是一种更有用的通过日常经验对现象的近似描述。但是随着频率增高，对于我们通常用来进行测量的仪器，现象的粒子的一面就变得更明显。实际上，虽然我们提到过许多频率，但是迄今并没有探测过任何直接涉及10^{12}周/秒以上频率的现象。我们只是根据一条假定量

子力学的波粒二象性成立的定则，从粒子的能量推出更高的频率的存在。

于是我们对电磁相互作用就有了一种新看法。我们有了一种新粒子，加入到电子、质子和中子的行列中。这种新粒子叫做光子。这种对电子和质子之间的相互作用的新看法叫做量子电动力学，它就是电磁理论，但是其中一切内容在量子力学上都是正确的。它是光与物质之间相互作用，或电场与电荷之间相互作用的基础理论，是物理学中迄今最成功的理论。在这个理论中，我们得到了除万有引力和原子核过程外一切通常现象的基本法则。例如，从量子电动力学得出了全部已知的电学、力学和化学定律：弹子球碰撞的定律，导线在磁场中运动的定律，一氧化碳的比热，霓虹灯的颜色，食盐的密度，氢和氧发生反应生成水，它们全都是这个新理论的推论。如果情况足够简单，使我们能够做出近似，就能推出所有这些细节；当然情况几乎永远不会如此简单，但是常常我们多少能够理解所发生的事情。迄今为止，在原子核之外我们还没有发现量子电动力学定律有例外，而在原子核里，我们不知道是否有例外，因为我们还不清楚原子核里发生的过程。

于是，在原则上，量子电动力学就是全部化学和生命科学的理论——如果生命科学最终可以归结为化学、从而也就归结为物理学的话，因为化学已经归结为物理学（与化学有关的那一部分物理学早就知道了）。不止如此，量子电动力学这个伟大的理论，还预言了许多新的事实。首先，它说明了甚高能光子、γ射线等的性质。它还有另一个重要的预言：在电子之外，还应当存在另外一个质量相同、但是电荷反号的粒子，叫做正电子，这两种电子碰到一起时，会彼此湮没而发射光或γ射线。（归根结底，光和γ射线是一回事，只是频率不同。）这个事实的推广，即每一种粒子都有一种反粒子，也被发现是正确的。在电子的场合，反粒子有另一个名称——正电子，但是对别的粒子，其反粒子就叫做反什么什么子，像反质子、反中子。在量子电动力学中，引进了两个数值，认为世界上大部分其他数值都可以从这两个数值推导出来。这两个基本数值就是电子的质量和电子的电荷。实际上，事情并非完全如此，因为化学中还有一套数据，告诉我们不同的原子核有多重。这就把我们引向下一题目。

2-4　原子核和粒子

原子核是由什么组成的，它们又是怎样结合在一起的？我们发现，原子核是靠极大的力结合在一起的。把原子核松绑时会放出巨大的能量，它与化学能量之比同原子弹爆炸与TNT炸药爆炸之比相同，这是当然的，因为原子弹与原子核内的变化有关，而TNT的爆炸与原子外层的电子的改变有关。问题是，这种把质子和中子在原子核里结合在一起的力到底是一种什么力？汤川秀树（Yukawa）提出，正像电相互作用可以和一种粒子——光子联系起来一样，中子和质子之间的力也有某种场存在，这个场振动起来时其行为像是一个粒子。因此世界上除了质子和中子以外还可能有一些其他的粒子，并且他能从已知的核力特征推出这些粒子的性质。例如，他预言，这种粒子的质量应当是电子质量的两三百倍；而你瞧，在宇宙线里，发现了一个质量是这个数值的粒子！不过后来发现这个粒子不是汤川预言的粒子。它叫μ介子或μ子。

但是，没过多久，在1947年或1948年，发现了另外一个粒子，π介子或π子，它满足汤川的判据。这样，除了质子和中子外，为了得到核力，我们还必须加上π子。于是你说："真棒！有了这个理论，我们就可以像汤川想的那样用π子建立起量子核动力学了，看它行不行，如果行，万事万物都可以解释了。"但是很倒霉，后来发现，这个理论包含的计算极困难，没有人能够从这个理论算出什么结论并用实验来检验它。现在差不多已20年了，情况一直如此。

因此我们被这个理论难住了，我们不知道它到底是对还是错，但是我们知道它的确有点毛病，至少是不完备。正当我们在理论上徘徊不前，试图从这个理论算出一些结果时，实验物理学家却发现了一些东西。例如，他们已经发现了μ介子或μ子，但是在理论中却没有它的地位。另外，在宇宙线里，还发现了大量其他"额外"的粒子。今天我们已经知道大约有30种粒子，很难理解所有这些粒子之间的关系：大自然要这些粒子做什么？这个粒子和那个粒子有什么联系？今天我们还不能把这些粒子理解为同一事物的不同的侧面，我们有这么多互不关联的粒子的事实本身，就表明我们还缺乏一个良好的理论，来说明这么多互不关联的信息[9]。在量子电动力学的巨大成功后，我们已有了一定的原子核物理学知识，但这些知识是粗糙的、半经验半理论的，它假设质子和中子之间的力为某一类型，然后看会有什么结果，而不真正理解力的来源。除了这些之外，我们取得的进展就很少了。在化学方面，我们曾有过大量的化学元素，突然间，元素之间显现出我们未曾预期的关系，具体说就是门捷列夫周期表。比方，钠和钾的化学性质大致相同，它们在门捷列夫周期表里就处于同一列中。我们一直在为新粒子探寻这种门捷列夫式的表。一张这样的新粒子表是美国的盖尔曼和日本的西岛各自独立提出的。他们的分类的基础是一个新的数，叫做"奇异性"S，每个粒子都有一个S值，就像电荷一样。在核力引发的过程中，粒子的奇异性也像电荷一样是守恒的。

在表2-2中列出了所有的粒子。在这里我们无法对这个表详做讨论，但这个表至少会告诉你还有多少是我们所不知道的。在每个粒子下面给出它的质量，单位为MeV（兆电子伏）。1MeV等于1.782×10^{-27}克。选用这个单位是由于历史原因，我们这里不去说它。质量越大的粒子排在表中越高的地方；我们看到，中子和质子的质量几乎相同。在竖直的每一列中的粒子有相同的电荷，所有的中性粒子在同一列里，所有带正电的粒子在这一列的右边，所有带负电的粒子在其左边。

在表中，粒子用实线表示，而虚线表示的则是“共振态”。表中略去了几个粒子，它们包括重要的零质量、零电荷的粒子，即光子和引力子，它们不属于重子介子轻子的分类框架之内；还包括一些较新的共振态（K^*，φ，η）。在表中列出了介子的反粒子，但是轻子和重子的反粒子则不得不列在另一张表中，它看起来正好是这张表对于中间的零电荷列的左右反演。虽然除了电子、中微子、光子、引力子和质子之外的所有粒子都是不稳定的，但在表中只列出了共振态的衰变产物。轻子没有奇异数，因为它们与原子核没有强作用。

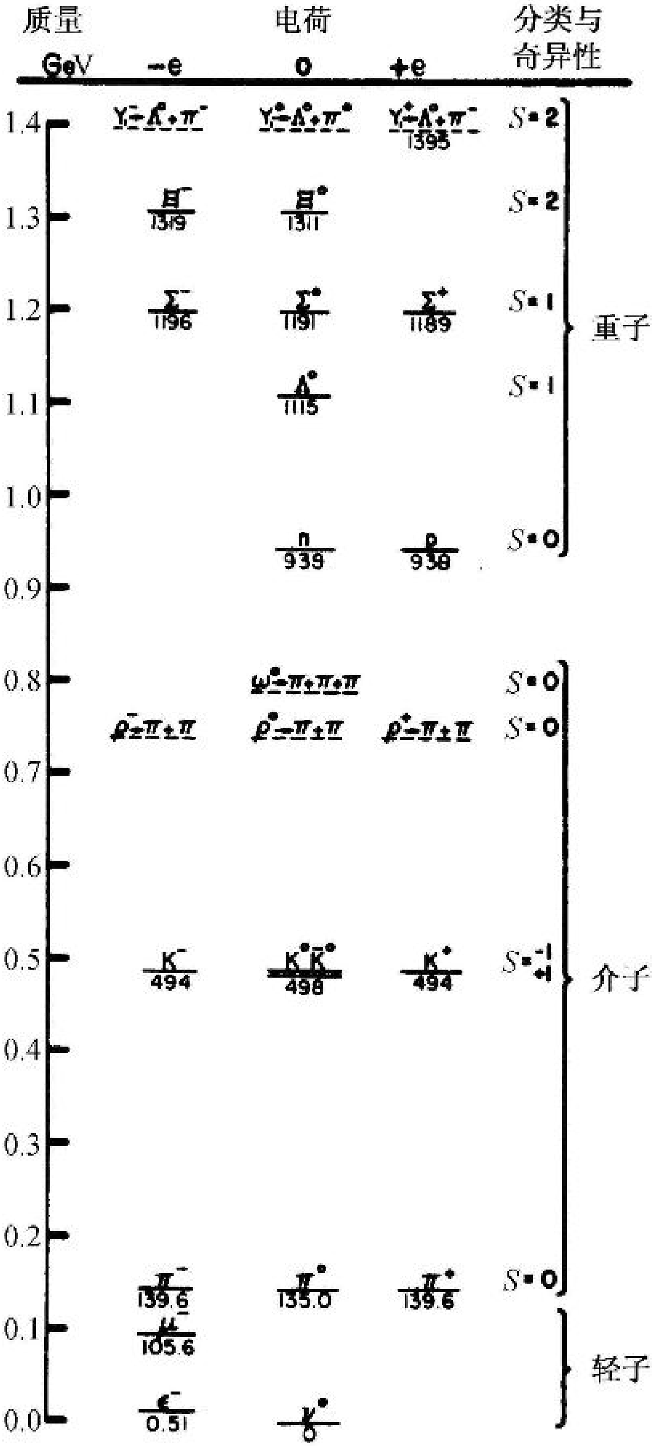


表2-2基本粒子

所有与中子和质子放在一起的粒子统称重子，有以下几种：Λ粒

子，质量为1115 MeV；三个别的粒子，叫负Σ子、中性Σ子和正Σ子，它们的质量几乎相同。粒子分成一组一组或多重态，同一组中的成员的质量几乎相同，只差百分之一到百分之二，并且奇异数相同。第一个多重态是质子中子二重态，然后是Λ子单重态，再往后是Σ子三重态，最后是Ξ二重态。最近，在1961年，又发现了几个粒子。但是它们是粒子吗？它们的寿命如此之短，几乎刚一形成就蜕变了，我们不知道是应当把它们看做新粒子呢，还是应当看成它们的蜕变产物Λ子和π介子之间具有某一确定能量的“共振”相互作用。

重子以外的卷入核相互作用的粒子叫介子。首先是π介子，它有三种形态：正、负和中性；它们组成另一个多重态。我们还发现了某些新粒子叫做K介子，它们是一个二重态，K^+和K^0。而且，每个粒子都有其反粒子，除非一个粒子是它自身的反粒子。例如π^+和π^-互为反粒子，但π^0是自身的反粒子。K^-和K^+互为反粒子，K^0和K^0也互为反粒子。此外，1961年又发现了一些介子或可能的介子，它们几乎刚一形成就蜕变。其中一个叫ω的具有780MeV的质量，它蜕变为三个π介子，还有一个不太确定的东西蜕变为两个π介子。以上这些叫做介子和重子的粒子，以及介子的反粒子，都放在同一个表中，但是重子的反粒子则必须放在另一个表中，后一表是前一表对零电荷列的“反射”。

门捷列夫的周期表很完善，除了有一些稀土元素挂在外面。同样，也有一些粒子挂在我们这个表之外，这些粒子并不在原子核里强烈地相互作用，它们与核作用无关，没有强相互作用（指核能的强有力的相互作用）。这些粒子叫做轻子，有以下这些：电子，它的质量很小，只有0.510MeV。还有一个，μ介子或μ子，它的质量大得多，是电子的206倍。我们所能说的是，根据迄今所有的实验，电子和μ子之间的惟一差别仅在于质量。μ子的一切方面都和电子完全相同，除了μ子比电子重。为什么有一种更重的粒子？它有什么用？我们不知道。此外，还有一个中性的轻子，叫做中微子，它有零质量。事实上，现在知道有两种不同的中微子，一种与电子有关，另一种与μ子有关。

最后，我们还有两种粒子，它们与核子没有强相互作用：一种是光子，另一种也许是具有零质量的引力子——如果引力场也有一个量子力学理论的话（量子引力理论还没有建立），就应当有这样一种粒子。

什么是“零质量”？这里说的质量是粒子静止时的质量。一个粒子具有零质量意味着它不能静止。光子是永远不会静止的，它总是以每秒300000千米的速度运动。当我们在适当的时候学了相对论以后，我们对质量就会懂得更多一些。

这样，我们就面对着一大群粒子，它们合起来像是物质的基本组分。还好，这些粒子在它们的相互作用中的行为并不是全都不同的。事实上，粒子之间的相互作用似乎仅有四种，按照强度减小的顺序，它们是：核力，电相互作用，β衰变相互作用和引力。光子与所有的带电粒子相耦合，其相互作用的强度用一个数1/137来量度。这种耦合的详细

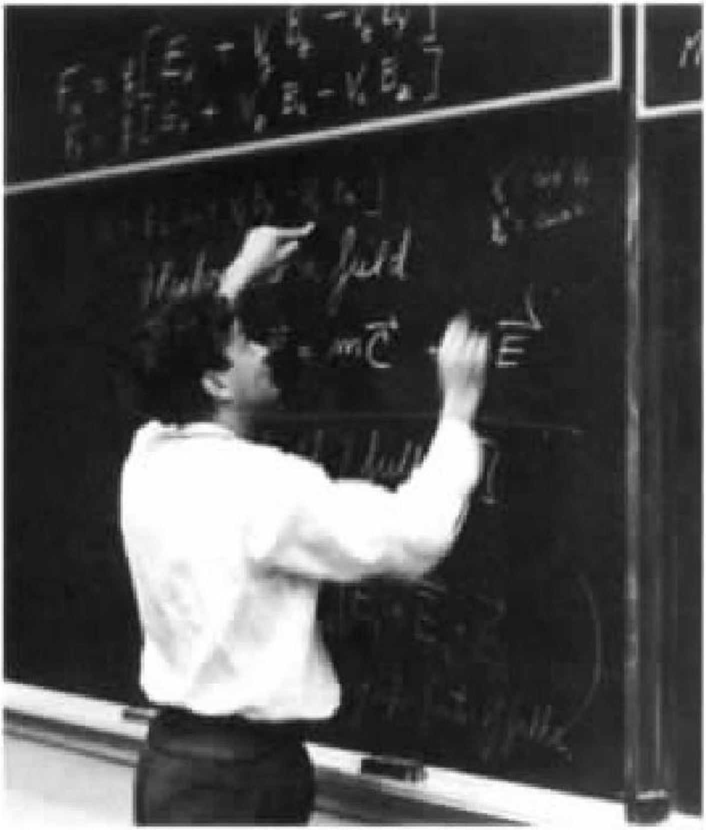
定律已经知道了，那就是量子电动力学。引力同一切能量相耦合，但耦合强度极弱，比电作用弱得多。引力的定律也已经知道了。然后是所谓弱作用——β衰变了，它使中子相对缓慢地蜕变为质子、电子和中微子。它的定律还只是部分知道。所谓强相互作用即介子重子相互作用之强度为1，它的定律还完全不知道，虽然已有了一些已知的定则，比方重子数在任何反应中不变。

表2-3基元相互作用

耦合种类	强度*	定律
光子与带电粒子	$\sim 10^{-2}$	已知
引力与一切能量	$\sim 10^{-40}$	已知
弱作用	$\sim 10^{-5}$	部分知道
介子与重子	~ 1	还不知道（已知某些定则）

*“强度”是每种相互作用中的耦合常数的无量纲量度（～意味着“近似于”）

这就是今天物理学面临的情况。总结一下，我可以这样说：在原子核外，看来什么都知道了；在原子核里面，量子力学是成立的——还没有发现量子力学的原理在那里失效。我们要说，积聚我们知识的舞台是相对论性时空，引力或许就包括在时空中。我们不知道宇宙是怎样开始的，我们从未做过实验，在某个小距离以下精确检验过我们关于空间和时间的概念，因此我们只确知，我们的概念在大于那个距离的尺度上是成立的。我们还应当加上，这场弈棋的规则是量子力学的原理，就我们迄今所知，这些原理像适用于已知的老粒子一样适用于新发现的粒子。核力的起源导致我们发现新粒子，但是糟糕的是，新发现的粒子太多了，我们缺乏对它们的相互关系的完整理解，虽然我们已经知道它们之间存在一些非常出人意外的关系。我们看来是在摸索着前进，逐步接近对亚原子世界的理解，但是我们确实不知道，为完成这个任务我们还得走多远。



第三章　物理学与其他学科的关系

3-1　引言

物理学是最基础的、包罗万象的学科，它对整个科学发展有过深远的影响。事实上，物理学是过去所称的自然哲学在今天的等当物，现代科学的大部分来自于自然哲学。由于物理学在一切自然现象中所起的基础性作用，许多领域内的学生都发现自己在学习物理学。在本章中，我们将试图说明其他学科中有哪些基础性问题，但是，在这么一点篇幅内，当然不可能真正讨论这些其他领域内的复杂、微妙和美丽的内容。缺少篇幅也使我们不能讨论物理学与工程、产业、社会和战争之间的关系，甚至不能讨论数学和物理学之间的最引人注目的关系。（在我们看来，从数学不是一门自然科学的意义上来说，数学并不是一门科学。它的正确性不是用实验来检验的。）顺便说一句，我们必须从一开始就讲清楚，一件事情不是科学，这并不一定是坏事。例如，爱就不是科学。因此，如果说什么事不是科学，这并不意味着这件事有什么错；这仅仅意味着它不是科学。

3-2　化学

受物理学影响最深的科学也许就是化学了。在历史上，化学早期的内容几乎完全是今天所称的无机化学，即与生物体无关的物质的化学。为了发现许多元素的存在和它们的关系——即它们怎么组成岩石、泥土等中的种种简单的化合物，曾进行过大量的分析。早期的化学对物理学是非常重要的，这两门学科之间的相互作用非常之大，因为原子理论在很大的程度上是由化学实验证实的。化学理论，即关于化学反应本身的理论，在很大的程度上被总结在门捷列夫的周期表中，周期表揭示了各种元素之间的许多奇特的关系，它是构成无机化学的种种定则的汇总：哪一种元素可以和哪一种元素化合、怎样化合，等等。所有这些定则最终在原则上得到量子力学的解释，因此理论化学实际上就是物理学。但是，必须强调，这种解释只是原则上的。我们已经讨论过知道弈棋规则和会下棋之间的区别。我们可以知道规则，但是下得不怎么样。我们发现，要精确预言某一化学反应的结果是非常困难的；但无论如何，理论化学的最终的归宿是在量子力学中。

还有一门由物理学和化学共同发展起来的极其重要的分支学科，那就是把统计学方法应用于力学规律起作用的场合，这个分支被贴切地称为统计力学。在任何化学场合下，都包含有大量的原子，而我们已经看到，原子总是在以非常无规和复杂的方式不断地振动。如果我们能够分析每一次碰撞，并且能够跟踪每个分子运动的细节，我们或许能够计算出会发生什么，但是要跟踪所有这些分子所需要的大量数据，将会远远超出任何计算机的容量，当然也会超出人脑的容量，因此重要的是要开发一种方法来处理如此复杂的情况。统计力学便是关于热现象或热力学的学科。无机化学作为一门科学，现在实质上已归结为物理化学和量子化学；物理化学研究的是反应的速率和发生的详细情况（分子如何碰撞？哪些碎片先飞走？等等），而量子化学则帮助我们通过物理定律来理解所发生的事。

化学的另一个分支是有机化学，与生物体有关的物质的化学。人们曾一度相信，与生物体有关的物质是如此神奇，它们是不可能用人工方法从无机物制得的。事情完全不是这样——有机物完全可以像无机化学中的物质那样用人工制得，只是包含的原子排列更复杂。有机化学显然同提供有机物的生物学、同工业有密切的关系，并且物理化学和量子力学的许多内容可以像应用于无机物一样应用于有机物。但是，有机化学的主要内容并不是在这些方面，而是在分析与合成生命系统中、生物体中形成的物质。这样，我们就在不知不觉中被逐步带到生物化学，进而被领入生物学本身，或分子生物学。

3-3　生物学

这样我们就进入了生物学，研究生物体的科学。在生物学的早期，生物学家限于进行纯粹的描述性工作，找出有哪些生物体，所以他们要做的便是诸如此类的事，像数数跳蚤脚上有多少根毛之类。在以很大的兴趣做完这些事之后，生物学家们进而考虑生物体内部的机制，起初当然是以比较粗略的观点，因为要掌握详情细节是需要经过一番努力的。

物理学和生物学之间早期的关系中曾有过一件有趣的事：生物学帮助物理学发现了能量守恒定律。迈耶（May-er）在关于生物吸收和放出的热量的问题上首先显示了能量守恒。

只要我们更细致地观察动物的生物学过程，就会看到许多物理现象：血液的循环、心脏的跳动、血压等。还有神经：当我们踩在一块尖石头上，我们知道发生了什么事，信息不知用什么方式从脚底传了上来。信息是怎样传递的是很有趣的。生物学家通过对神经的研究，得出了这样的结论：神经是纤细的小管子，有非常薄而复杂的管壁；细胞通过这层管壁抽运离子，管外有正离子而管内有负离子，就像个电容器一样。这层薄膜有一个有趣的性质：如果它在某个地方“放电”，即有一些离子通过这个地方，使这里的电压减少，那么这样造成的电效应就会让邻近的离子感觉到，影响邻近地点的薄膜，使它也让离子通过。这又依次影响到越来越远的地方，于是就出现一个波，它是薄膜的“可渗透性”的变化，当神经纤维的末梢由于踩到尖石头而受到“激发”后，它就沿着神经纤维传播。这个波有点像一长列竖立的多米诺骨牌，当末端的一个被推倒，它就将邻近的一个带着推倒，等等。当然，这只能传递一个信息，除非把所有的多米诺骨牌重新扶起来排好；同样，在神经细胞中，也有把离子缓慢地重新排出的过程，使神经为下一个脉冲做好准备。就是这样一个过程让我们知道我们正在做什么（或至少让我们知道我们在什么地方）。当然这个与神经脉冲有关的电效应可以用电子仪器检测到，而且，由于有电效应存在，关于电效应的物理学对理解这种现象显然很有帮助。

反过来的效应是从大脑中某处沿着神经送出一个信息。这时在神经末梢发生什么情况呢？神经在这里分成纤细的分支，与肌肉纤维附近的一个叫做终板的结构连接。由于一些现在还不完全理解的原因，当脉冲到达神经末梢时，会射出一小团叫做乙酰胆碱的化学物质（每次5到10个分子），它们影响肌肉纤维，使它收缩——这多么简单！什么使肌肉收缩呢？肌肉是由大量紧挨着的纤维组成的，含有两种不同的物质：肌球蛋白和肌动球蛋白，但是由乙酰胆碱引发的化学反应为什么能够改变分子的大小，其机制现在还不清楚。因此在肌肉中引起机械运动的基本过程现在还不清楚。

生物学的领域是如此广阔，有大量的问题我们根本无法叙及，这包

括视觉的机制（光在眼睛里干了些什么）、听觉的机制等问题（思维进行的机制将在后面心理学一节中讨论）。可是，从生物学的观点来看，我们刚才讨论的这些关于生物学的事情实际上并不是基础性的，并不是生命的根本，即使我们理解了它们，我们还是不理解生命本身。举个例子：研究神经的人认为他们的工作是很重要的，因为毕竟不论什么动物都有神经。但是没有神经仍然可以有生命。植物既没有神经也没有肌肉，但是它们照样生存着，照样活着。因此对生物学的基本问题，我们必须看得更深刻一些。如果我们这样看，我们就会发现，所有的生物体有许多共同的特征。最普遍的特征是它们都是由细胞组成的，在每个细胞内都有发生化学反应的复杂机制。例如，在植物细胞中有利用光生成蔗糖的机制，蔗糖在黑暗中又消耗掉以维持植物的生命。当植物被动物吃掉后，蔗糖在动物体内产生一系列化学反应，这些化学反应同植物体内的光合作用（及其在黑暗中的反向作用）有很密切的关系。

在生命系统的细胞内，有许多复杂的化学反应，在反应中一种化合物变成另一种化合物，再变成另一种化合物。为了对生物化学研究中做出的巨大努力有一些印象，我们在图3-1中总结了迄今为止所知道的在细胞中发生的化学反应的很小一部分（大约只占细胞中的全部化学反应的1%左右）。

这里我们看到一系列的分子，它们在由一串不多几步构成的循环中从一种变成另一种。这个循环叫做克雷布斯循环[10]或呼吸循环。从分子里发生的变化来看，每种化合物和每步反应都不复杂，但是这些反应在实验室里却相对地难以完成——这是生物化学中一个非常重要的发现。如果我们有一种物质和另一种很相似的物质，前者并不顺当地转变成后者，因为二者之间通常隔着一个能量障碍或“位垒”。考虑这样一个比方：如果我们想要把一个物体从一个地方挪到另一个地方，两个地方在同一海拔高度上，但是隔着一座小山。我们可以把它推过山顶，但是就需要若干附加的能量。因此大多数化学反应都不会发生，因为有一种所谓活化能横亘在它们之间。为了在一种化合物中增加一个额外的原子，需要使这个原子和该化合物挨得足够紧，这样才能发生某种重新排列，然后它才会结合到那个化合物上去。但是如果我们不能给它足够的能量使它足够靠近，这个反应就不会完成，原子只会爬上这座“山”的山腰然后又退回来。可是，如果真的能够把分子拿在手中，把它的原子扒拉来扒拉去以使得出现一个缺口，让新原子进来，然后再把缺口很快堵上，那么我们就找到了另一个办法，即绕过小山，这就不需要额外的能量，而反应就容易进行。在细胞里实际存在一种很大的分子，比我们刚刚描述过其变化的分子大得多，这种大分子以某种复杂的方式使较小的分子处于正好的状态，使得反应容易发生。这些大而复杂的分子叫做酶。（它们起初叫做酵素，因为是在糖的发酵过程中发现的，事实上克雷布斯循环最初找到的一些反应都是在发酵中发现的。）有酶存在时反应就会进行。

酶是由另一种叫做蛋白质的物质构成的。酶分子大而复杂，每种酶都不同，用来控制特定的反应。在图3-1中的每个反应上写出了有关的酶

的名称。（有时同一种酶可以控制两个反应。）我们强调，酶本身并不直接参与反应。它们并不变化，只是让一个原子从一个地方挪到另一个地方。做完以后，它又准备好对下一个分子做同样的事，就和工厂里的机器一样。当然，得要有供应原子的源和处置其他原子的方法。以氢为例：有几种酶，其上具有特殊的单元，能在一切化学反应中运送氢原子。例如，有三四种脱氢酶，在我们整个循环的不同地方要用到。有趣的是，在一个地方释放某些氢原子的机制，将取走这些氢原子并用到别的地方。

图3-1的循环中，最重要的是GDP（二磷酸鸟嘌呤核苷）到GTP（三磷酸鸟嘌呤核苷）的转变，因为它们之中一种物质的能量比另一种物质多得多。正像在某些酶中有一个运送氢原子的"盒子"一样，也有特殊的运送能量的"盒子"，这包括三磷酸基。因此，GTP具有比GDP更多的能量；如果反应朝某个方向进行，我们就制造出具有额外能量的分子，这些分子能够驱动另一种需要能量的反应，比如肌肉的收缩。如果没有GTP，肌肉就不会收缩。我们可以拿一些肌肉纤维放在水里，往水里加GTP，如果存在合适的酶，肌肉纤维就收缩，GTP就变为GDP。因此真实的系统是处于GDP　GTP转变中；在晚上，GTP积存起来，而白天则用掉，使整个循环往另一个方向进行。你看，酶并不在乎反应往哪个方向进行，否则就会违反一条物理学定律。

物理学在生物学和其他科学中极其重要，还有另一个原因，这同实验技术有关。事实上，如果没有实验物理学的巨大发展，今天就不可能知道这些生物化学循环图。这是因为，分析这个极为复杂的系统的最有用的工具，就是对反应中用到的原子加标记。于是，如果我们可以把一些上面有"绿色标志"的二氧化碳引入循环中，然后在3秒钟后测量绿色标志在什么地方，然后在10秒钟后再测量绿色标志在什么地方，等等，我们就可以追踪反应的过程。什么是"绿色标志"呢？它们是不同的同位素。我们还记得，原子的化学性质是由电子的数目决定的，而不是由原子核的质量决定的。但是，比方说碳，碳原子核中，和一切碳核都有的6个质子在一起，可以有6个中子或者7个中子。在化学上，两种原子C_{12}和C_{13}是相同的，但是它们的质量不同，核的性质不同，因此是可以辨别的。利用这些不同质量的同位素，或甚至利用像C^{14}这样的放射性同位素（它提供了更灵敏的追踪微量物质的手段），就能够追踪反应的进程。

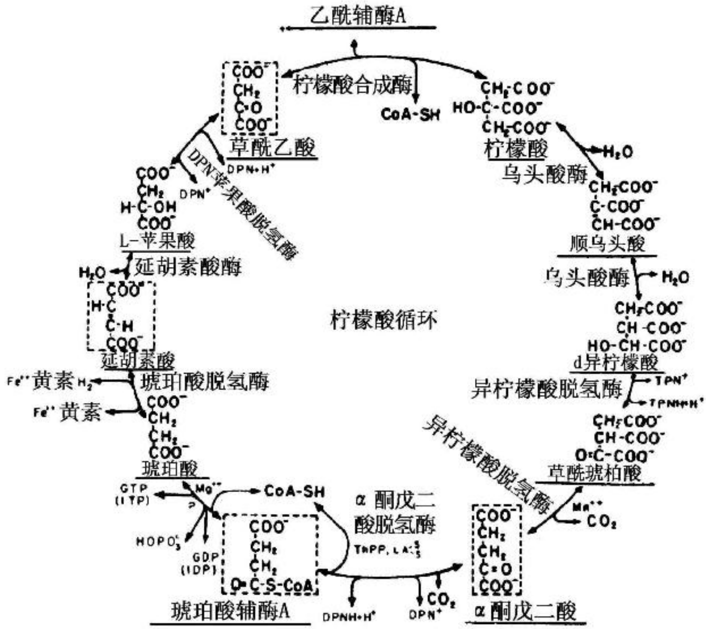


图3-1　克雷布斯循环

现在，我们回过头来描述酶和蛋白质。所有的蛋白质并不都是酶，但是所有的酶都是蛋白质。有许多种蛋白质，比如肌肉中的蛋白质，结构蛋白质，它们存在于诸如软骨、头发、皮肤等之中，这些蛋白质本身并不是酶。但是，蛋白质是非常有特征的生命物质：首先，它们组成了所有的酶；其次，它们构成了大部分其余的生命物质。蛋白质具有很有趣而简单的结构。它们是一串不同的氨基酸，或一条氨基酸链。共有20种不同的氨基酸，它们都能互相组合形成链，其中的骨架是CO-NH等。蛋白质不是别的，正是各种不同氨基酸组成的链。每种氨基酸可能是用于不同的具体用途。例如，有些氨基酸在某个地方有一个硫原子；当同一蛋白质分子中有两个硫原子时，它们就形成一个键，也就是说，它们在这两点上把链接起来形成一个环。另一个氨基酸有额外的氧原子，这使它成为酸性物质；还有一种则有碱性特征。它们之中有一些在一旁挂着一个巨大的原子团，从而占据很大的空间。有一种叫做脯氨酸的氨基酸实际上不是氨基酸，而是亚氨基酸。它们有些小区别，结果当链里含有脯氨酸时，链就会有一个扭结。如果我们想要制造某种具体的蛋白质，就应当遵照这些规则：在这里放一个硫钩；再加上某种东西占据空间；然后再添上某种东西使链有一个扭结。这样，我们就将得到一条样子复杂的链，它钩连在一起，具有某种复杂的结构；这大概就是所有各种酶生成的方式。从1960年以来我们获得的一个重大胜利是终于弄清楚了某些蛋白质中原子的精确空间位置，这些蛋白质里排着大约56到60个氨基酸分子。在两种蛋白质的复杂图样中已经定位了1000个以上的原子（如果把氢原子也算进来就接近2000个原子）。第一种是血红蛋白。这个发现的一个不尽如人意之处是，我们并不能从这幅图样中看出任何东西；我们不理解为什么它具有那样的性能。当然，这是有待解决的问

题。

另一个问题是，酶怎么知道该成为什么？一只红眼蝇生出一只小红眼蝇，因此产生红色素的全部酶组的信息必定从一代传给下一代。这是由细胞核中一种叫做DNA（去氧核糖核酸的缩写）的物质完成的，它不是蛋白质。这种关键物质由一代细胞传给下一代细胞（例如，精细胞主要由DNA构成），并且携带着如何生成酶的信息。DNA是一张“蓝图”。这张蓝图是什么样子？它怎么工作？首先，这张蓝图必须能够复制它自己。其次，它必须能够给蛋白质下指令。谈到复制，我们也许会以为这个过程像细胞的复制一样。细胞是简单地长大然后分裂成两半。那么，DNA分子也必须这样长大然后分裂成两半吗？每个原子肯定不会长大并分成两半！不，只有通过某种更聪明的方法，才能复制出一个分子来。

对DNA的结构已经研究了很长一段时期了，首先用化学方法求出它的成分，然后用X射线方法求出它的空间图样。结果得到下述重大发现：DNA分子是一条双链，彼此缠绕在一起。这条链与蛋白质链类似，但化学成分完全不同。每条链的骨架是一系列糖和磷酸基，如图3-2所示。于是我们看出这条链怎么能够包含指令了，因为如果我们能够把这条链从中间劈开，我们就会得到一个序列BAADC……而每一种生物可以有一个不同的序列。因此，制造蛋白质的特定指令也许以某种方式包含在DNA的特定序列中。

附在沿着链的每一个糖分子上，并且把两条链连结在一起的，是一些交叉连结对偶。它们并不都属于同一种，我们且管它们叫A,B，C,D。有趣的是，它们两两配对，只有同一对中的两个才能坐在一起，比如A和B是一对，C有四种，分别叫做腺嘌呤、胸腺嘧啶、胞嘧啶和鸟嘌呤，但和D是一对。这些对偶这样放置在两条链上，使它们“彼此对合”，具有很强的相互作用能。然而C不会和A相配，B也不会和C相配；它们只会配成对偶，A对B,C对D。于是如果一个是C，另一个就一定是D，如此等等。不论一条链上有些什么字母，在另一条链上同样位置的必定是其对偶字母。

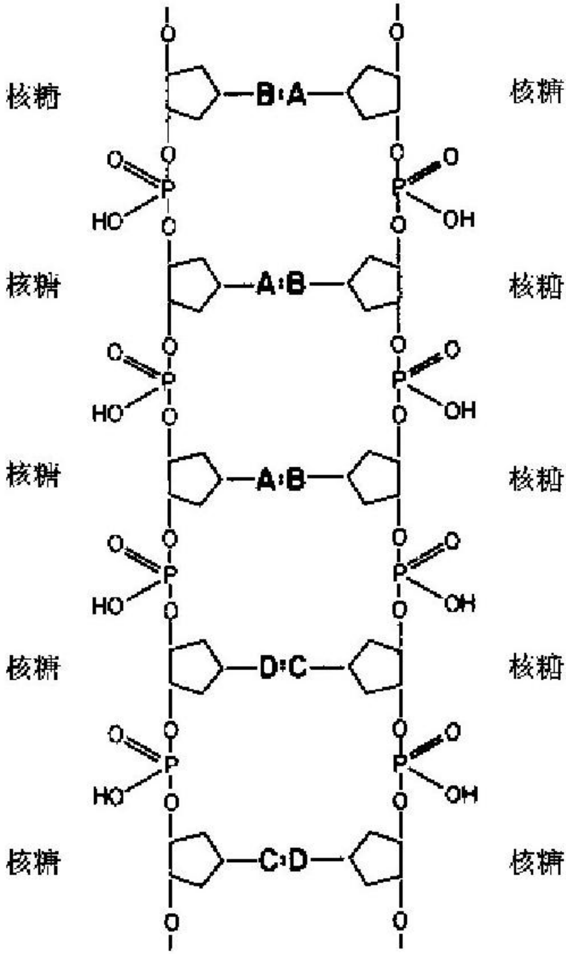


图3-2　NA结构示意图

那么复制是怎么回事呢？假定我们把这条双链从中间切开成两条单链。我们怎么能制出和原来完全一样的另一半呢？如果在细胞的物质里有一个制造部门，它产生出磷酸盐、糖和没有连成一条链的A、B、C、D单元，那么将要添加到我们劈裂的单链上的只会是正确的对偶单元，BAADC……的互补的对偶体ABBCD……于是实际过程是这样的：当细胞分裂时，链也从中间分开，一半最终和一个细胞在一起，另一半则跟着另一个细胞；在分离之后，每条单链都生成一条新的互补的另一半。

接下来的问题是，精确地说，A、B、C、D的顺序如何决定蛋白质中氨基酸的排列？这是今天生物学中还没有解决的中心问题。不过，已有了一些初步线索或零碎的信息：在细胞中有一些微小粒子，叫做微粒体，现在知道它就是蛋白质生成的地方。但是微粒体不在细胞核内，而DNA及其指令却在细胞核里。这似乎是个麻烦。然而，现在也知道，有小的分子断片从DNA中放出，它没有携带全部信息的巨大DNA分子本身那么长，而像是它的一小段。它叫做RNA，但名字无关紧要。它是DNA

的一种拷贝——一份缩微的拷贝。RNA以某种方式携带着生成哪一种蛋白质的信息去到微粒体中，这我们已经知道了。当它到达那里后，微粒体就合成出蛋白质，这我们也知道了。但是，氨基酸是怎样进来以及它们是怎样根据RNA上的密码而排列成某种蛋白质的，其细节我们仍然还不知道。我们不知道怎样去解读密码。比方说，如果我们知道一段序列ABCCA，我们也无法告诉你要生成的是哪种蛋白质。

在当代，肯定没有哪门学科或者领域，能够像生物学那样，在如此多的前沿上取得如此大的进展。如果我们要提名一个引导我们在理解生命的探索中不断前进的最强有力的假设，那就是万事万物都是由原子构成的，并且生物体的一切行为都可以通过原子的振动来理解。

3-4　天文学

在我们对整个世界的这个跑马观花式的解说中，现在必须转到天文学。天文学比物理学更古老。事实上，正是表明了恒星和行星的运动的奇妙的简单性才使物理学得以发轫，对它的理解是物理学的开始。但是全部天文学中最重大的发现是，所有的星星都是由同地球上一样的原子组成的[11]。这是怎么知道的呢？原子放出确定频率的光，这有点像乐器的音色，它有确定的音高或声音频率。当我们听到几个不同的音调时，我们可以把它们分开，但是当我们用眼睛看几种颜色的混合时，我们却不能说出它的成分颜色，因为眼睛在这方面的辨别能力远比不上耳朵。但是，用一台光谱仪我们可以分析光波的频率，用这个方法我们可以看到不同星球上的原子发出的真正"音调"。事实上，有两种元素是先在星星上然后才在地球上发现的。氦是在太阳上发现的，它的名字即由此而来[12]，而锝则是在某些冷星上发现的。这当然使我们在理解星星方面取得了进展，因为它们是由和地球上一样的原子组成的，而今天我们已经知道了不少关于原子的知识，特别是原子在高温而密度不太大的状态下的行为，于是我们就可以用统计力学方法来分析星体物质的性能。即使我们不能在地球上复现星体的状态，用基本的物理定律我们还是常常能够精确地或者非常近似地说出会发生什么事情。因此物理学帮助了天文学。看来似乎奇怪，我们对太阳内部物质分布情况的了解远胜于我们对地球内部情况的了解。你也许会猜想，对远处的恒星，我们只能通过一架望远镜看到一个小光点，要了解其内部情况是极其困难的，但实际上，我们对一颗恒星内部发生的情况的了解要比你猜想的强，因为我们可以计算星体中的原子在大多数情况下的行为。

给人印象最深的发现之一是使星星不断发热发光的能量的来源。它的发现者之一，在认识到恒星中必须进行着核反应才能发光之后，有一天晚上和他的女友出来散步。女友对他说："看哪，这些闪耀的星星多美啊！"他回答说："是啊，此时此刻，我是世界上惟一知道它们为什么发光的人。"女友只对他一笑。她并不对同当时是世界上惟一知道星星为什么会发光的人出来散步这一点有什么特别深的印象。是的，不为人理解是可悲的，但是这个世界就是这样。

正是氢核的"燃烧"给太阳提供了能量；在这个过程中氢核转变为氦核。而且在星体中心，从氢最终制造出各种化学元素。构成我们的身体的材料，是在某个星球上一次"烹制"好后喷射出来的。我们是怎么知道的呢？因为有一个线索。不同的同位素的比例——C^{12}占多少，C^{13}占多少，等等，是化学反应改变不了的，因为化学反应对两种同位素是相同的。它们的比例完全是核反应的结果。通过考察这些熄灭了、冷却了的炉灰（我们自己就是这种产物）中各种同位素的比例，我们就能够发现制造组成我们身体的材料的火炉是什么样子。这个火炉很像恒星，因此很可能我们的元素是在恒星中制造并且在爆炸中喷射出来的，我们管这种爆炸叫新星和超新星。天文学和物理学是如此密切相关，随着我们向

前行进，我们将学习许多天文学的东西。

3-5　地质学

现在我们转到人们所称的地球科学或地质学。首先是气象学和天气。当然气象学仪器是物理仪器，如我们前面所述，是实验物理学的发展使这些仪器成为可能。但是，物理学家从来没有得到过满意的气象学理论。你们会说："怎么啦，气象学中只考虑空气，而我们知道空气的运动方程。"的确我们知道。"那么，如果我们知道了今天的空气状态，为什么我们不能计算出明天的空气状态呢？"首先，我们并不真正知道今天的空气状态，因为空气到处涡动、打旋。它很敏感，甚至不稳定。如果你曾看到过水如何平滑地流过堤坝，然后在下落过程中变成大量的水珠和水滴，你就会懂得我说的不稳定是什么意思。你知道水流出溢水道之前的状态，它是完全平滑地流动的；但是一旦它开始往下掉，水滴是从哪里开始？是什么决定了水滴将会有多大以及它将在何处？这些都不知道，因为水是不稳定的，而空气更加。即使一团原来是平滑地运动的空气，在越过一座山时，就会变成复杂的旋涡和涡流。在许多领域我们都会遇到这种湍流情况，对这种情况今天我们还无法分析。那么，赶快离开天气这个题目，转而讨论地质学吧！

地质学的基本问题是，是什么使地球成为它今天这个样子？最明显的过程就在你们眼前，这就是河流、风等的侵蚀过程。这些过程很容易理解，但是对于每一点侵蚀都有等量的别的某种东西发生。平均说来，今天的山并不比它们过去低。因此必定有一种造山过程。如果你学习地质学，你将看到的确有造山过程和火山活动，这些现象占了地质学的一半内容，今天还没有人懂得。火山现象的实质没有人真正了解。造成地震的原因最终人们也不了解。现在知道的是，如果有什么东西推别的东西，就会突然断裂并将滑动——这是对的。但是是什么在推，并且为什么会推呢？现在的说法是，地球内部有一种流动——由于内外温度差而引起的环流，它们在运动中轻轻地推动地面。如果相邻有两股相反的环流，在它们相遇的地方物质就会堆积起来形成山脉，它们处于不平衡的受应力状态，从而引起火山爆发和地震。

地球的内部是怎样的？有关地震波穿过地球传播的速度和地球的密度分布的知识已经知道不少。但是，关于物质在地心处预期的压强下的密度该是多大，物理学家还未能提出一个良好的理论。换句话说，我们还不能很好地计算出在这些情况下物质的性质。我们对地球的了解远远比不上我们对恒星内物质状态的了解。这里涉及的数学今天看来似乎有点过于复杂，但是也许不会太久，就会有人认识到这是一个重要问题，并且真正解出它。另一方面，当然，即使我们知道了密度，我们也不能算出环流，也不能真正得知岩石在高压下的性质。我们无法得知岩石以多快的速度融化；这些统统得由实验给出。

3-6　心理学

下一步，我们考虑心理学。顺便说一句，精神分析并不是一门科学：它充其量是一个医疗过程，也许更像是巫医。它有一个关于病因的理论——有多种不同的“精灵”等。巫医有一个理论：一种疾病如疟疾是由一个进入空气的精灵引起的；但是他们治疗疟疾的方法并不是把一条蛇在患者头上摇动，而是奎宁。因此，如果你生病了，我会劝你去看巫医，因为他是部落里掌握疾病的知识最多的人；但是，他的知识不是科学。精神分析并没有用实验仔细检验过，无法给出一张清单，在多少例中它有效，多少例它无效，等等。

心理学的其他一些分支则没有这么有趣，这包括关于感觉的生理学——眼睛里发生什么情况，大脑里发生什么情况等。但是对这些题目的研究却得到一些微小但却实在的进展。一个最有趣的技术问题可以叫做心理学，也可以不叫做心理学。关于心灵（或者神经系统，如果你愿意的话）的中心问题是：当一个动物学会了做什么事之后，它就能够做它以前不会做的这些事，因此它的脑细胞一定也有变化，如果脑细胞是由原子构成的话。它在什么方面变得不同了？当什么东西被记住之后，我们不知道该到哪儿去找这种不同，也不知道该找什么东西的不同。当学会一件事后，我们不知道“学会”究竟意味着什么，不知道神经系统里发生了什么变化。这是一个非常重要的问题，还完全没有得到解决。假设存在着某种记忆体，大脑就是这么一个有大量互相交连的接线和神经的物体，它大概是不能用一种简单直接的方式分析的。它同计算机及计算单元有相似之处，它们都有大量的布线，它们有某种元件同突触或神经元接点相似。思维和计算机之间的关系是一个很有趣的题目，不过我们没有时间进一步讨论了。当然，必须了解，这个题目在有关通常人类行为的真实复杂性上能告诉我们的不多。各个人之间是如此不同。要了解人类的行为还需要很长的时间。我们必须从后方很远的地方出发。哪怕我们能够懂得一只狗的心理活动，那就是一个够了不起的成就了。狗是比较容易了解的，但是还没有人懂得狗的心理活动。

3-7 它是怎么变成这个样子的

为了使物理学不仅在仪器发明方面，而且在理论方面对别的学科有帮助，该学科必须向物理学家提供用物理学家的语言对其研究对象的描述。他们可能会问：“为什么青蛙会跳？”物理学家回答不了这个问题。如果他们告诉他青蛙是什么，有许多许多分子，这里有一条神经，等等，那就不一样了。如果他们或多或少告诉我们，地球或星星是什么样子，我们就能够把它们摹想出来。为了使物理学理论起作用，我们必须知道原子的位置。为了了解化学，我们必须精确知道在该问题中有哪些原子出现，否则就无法分析这个问题。当然，这只是一个方面的限制。

在姐妹学科中，有另一种问题，这个问题在物理学中是不存在的。由于缺乏一个更好的术语，我们可以称之为历史问题：它是怎样变成这个样子的？如果我们了解全部生物学，我们就会想知道，地球上所有的生物是怎么来的。我们有进化论，它是生物学的一个重要部分。在地质学中，我们不仅想知道山脉怎么正在生成，还想知道这个地球最初是怎么形成的，太阳系的起源，等等。当然，这就会使我们想要知道宇宙中曾有过哪种物质。星星是怎样演化的？初始状态如何？这是天体的历史问题。关于恒星的形成，关于构成我们身体的元素的形成，今天我们已经知道不少，甚至还知道一点关于宇宙起源的知识。

在物理学中目前不研究历史问题。我们没有这样的问题：“这些物理学定律是怎样变成这个样子的？”在目前，我们不想象，物理学定律会以某种方式随时间变化，物理学定律在过去和现在有什么不同。当然也不排除有这个可能，一旦发现物理学定律真的随时间变化，物理学的历史问题就将与宇宙的历史的其他问题交织在一起，而物理学家就将谈论天文学家、地质学家和生物学家同样的问题。

最后，在许多领域中存在一个共同的物理学问题，这是一个非常古老而又未曾解决的问题。它不是寻找新的基本粒子的问题，而是很久以前留下来的问题，已经有100多年了。尽管它对姐妹学科非常重要，在物理学中还没有人真正能够在数学上对它进行分析。那就是对湍流的分析。如果我们观察一颗恒星的演化，就会发现会有这么一个时刻到来，我们可以推断在此时刻将开始发生对流，但在此后我们就再也不能推断将发生什么事了。几百万年后这颗恒星发生爆炸，但是我们不能说出其原因。我们不能分析天气。我们不知道地球内部的运动图样。这个问题的最简单形式是取一根很长的管子，使水以高速通过它。我们问：使一定量的水通过这根管子，要加多大的压力？没有人能够从基本原理和水的性质出发来分析这个问题。如果水流得很慢，或者我们用很稠的黏性物质比如蜂蜜，我们可以很好地解决这个问题，这在你们的教科书上就有。我们实在不能处理的是实际的水流过管子的问题。这是一个有一天终将解决的中心问题，但是现在尚未解决。

一个诗人曾说过："这个宇宙就在一杯葡萄酒中。"我们大概永远不会知道他是在什么意义上说这句话的，因为诗人写诗不是让人去读懂的。但是如果我们足够细致地观看一杯葡萄酒，我们的确看到这个宇宙。这里有物理学的东西：涡动的液体，它的蒸发依赖于风和天气，玻璃上的反射，我们想象的原子。玻璃是地上岩石的提纯物，在它的成分中我们看到了宇宙年龄和恒星演化的奥秘。葡萄酒中的种种化合物有怎样奇特的排列？这些化合物是怎样产生的？这里有种种酵素、酶、基质和它们的生成物。在葡萄酒中发现了伟大的结论：整个生命就是发酵。所有研究葡萄酒的化学的人都会像巴斯德那样，发现许多疾病的原因。红葡萄酒多么鲜艳！把它深深铭刻在你脑海中吧！如果我们微弱的心智为了某种便利，把这杯葡萄酒——这个宇宙分为几部分：物理学、生物学、地质学、天文学、心理学等，那么让我们记住，大自然并不知道这种分法。所以让我们把所有这些都放回到一起，别忘记这杯酒最终的用途。让它最后再给我们一次欢乐：干杯，忘了它！



第四章　能量守恒

4-1　什么是能量

在结束我们对事物的一般性描述之后，从这一章开始，我们来更详细地研究物理学各个不同的方面。为了说明理论物理学中会用到的概念和那种推理方式，我们现在来考察物理学的最基本的定律之一——能量守恒定律。

有一个事实（如果你愿意，也可以说一条定律）支配着迄今我们知道的一切自然现象。还没有发现这条定律有任何例外——就我们所知它是绝对精确的。它叫做能量守恒定律。这条定律说，在自然界发生的多种多样的变化中，有一个量（我们管它叫能量）是不变的。这是一个极抽象的概念，因为它是一个数学原理；它说的是有一个数量，它在某件事情发生时保持不变。它不是对一种机制或任何具体东西的描述；它只是一件奇怪的事实：我们可以计算某个数值，当我们看完大自然玩过一场魔术后，再来计算这个数量，两次结果相同。（有点像象棋盘红格子上的象，不论走了多少步——具体步数不详——它仍在红格子上。能量守恒定律就是一条这种性质的定律。）由于它是一个抽象概念，我们将用一个类比来说明它的意义。

想象有个孩子，我们就叫他淘气鬼丹尼斯吧，他有一堆积木，这些积木绝对不会损坏，也不能分成更小的小块。每一块积木都和别的积木相同。我们假设他有28块积木。每天早上，他妈妈把他连同他的28块积木一起留在一个房间里。到了晚上，他妈妈出于好奇，仔细地对积木进行了点数，于是发现了一条唯象定律：不论丹尼斯怎样玩积木，积木数目总还是28块！这种情况持续了若干天，直到有一天，积木只有27块了，但是稍做寻找，她就发现地毯下面还有一块——她必须到处都看看才能确认积木数目没有变化。可是，有一天，积木数目看来是变了——只有26块了。仔细调查表明，窗户开了，向外一看，两块积木就在那儿。另一天，仔细数过之后表明，共有30块积木！这使她相当惊愕，后来才知道，布鲁斯曾带着他的积木来玩过，走的时候留下几块在丹尼斯的房间。她拿走了额外的积木，关上窗户，并且不让布鲁斯进来，此后一切都很正常。然而有一次，她点数之后，发现只有25块积木。但是，房间里有一个玩具箱，妈妈走过去要打开箱子，可是孩子尖叫着，说“不，别动我的玩具箱”，不让妈妈打开箱子。妈妈十分好奇，也比较有心眼，她想出了一个主意！她知道，每块积木重80克，以前她看见积木有28块时曾称过玩具箱的质量为450克。这一次她想核对一下，于是就再次称了箱子的质量，减去450克，再除以80克。她发现：

$$\text{看见的积木数}+（\text{箱子质量}-450\text{克}）/80\text{克}=\text{常数} \quad (4.1)$$

后来似乎又出现了新的偏差，但是仔细的研究表明，浴缸里的脏水的高度变了。孩子把积木扔到了水里，可是因为水太脏她看不见它们，但是她能求出有多少块积木在水里，这只要在她的公式里加上一项。由于原来的水面高15厘米并且每块积木使水面升高0.6厘米，新公式是

看见的积木数＋（箱子质量-450克）/80克＋（水面高度-15厘米）/0.6厘米＝常数。（4.2）

于是，在她的这个越来越复杂的世界里，她发现了一系列用来计算有多少块积木藏在不让她看的地方的项。结果她得到一个复杂公式，得到一个必须计算的量，不论孩子怎么玩，这个量永远不变。

这同能量守恒有什么相似之处呢？必须从这幅图景中抽掉的最显著的一点是，根本就没有积木。从（4.1）式和（4.2）式中拿掉第一项，我们发现自己是在做有些抽象的计算。相似的有以下几点：第一，在我们计算能量时，有时它的一部分离开系统跑出来，有时又有一些跑进去。为了验证能量守恒，我们必须注意不把任何能量放进去或取出来。第二，能量有多种不同的形式，每种形式有一个表示能量的公式。这些形式是：引力能、动能、热能、弹性能、电能、化学能、辐射能、核能、质能。如果我们把每种贡献的公式加在一起，它的总量就不会变化，除非有能量进出。

重要的是要认识到，在今天的物理学中，我们并不知道能量究竟是什么。我们并没有一幅图像，把能量摹想为有确定大小的小团。它不是那样的。但是，有一些计算某个数量的公式，当我们把它全都加在一起，就给出“28”——总是相同的数目。这是一个抽象的东西，它并不告诉我们各个公式的机制或原因。

4-2 重力势能

只有在有了各种形式的能量的公式之后，我们才能理解能量守恒。我想在这里讨论重力（地球表面附近的引力）势能的公式，我不想用历史上常用的那种方法来推导这个公式，而是用另一种方式，这种方式是专门为这次课设计的一条推理思路，为的是向你表明一件值得注意的事：从不多的事实出发加上严密的推理，就可以得出关于大自然的许多知识。它表明了理论物理学家所从事的工作的特性。这个推理方法仿效了卡诺讨论蒸汽机效率所用的非常漂亮的论证方法。[13]

考虑一台起重机——一种通过降低一个物体来举高另一个物体的机械。让我们还做一个假设：这种机械中没有永恒运动这一类事情发生。（事实上，根本不存在永动机正是能量守恒定律的一个普遍表述。）对永恒运动的定义必须小心。我们先对起重机来定义什么是永恒运动。如果我们在抬高和降低了许多重物并使机器回复到原来的状态后，发现净效果是升高了一个重物，那么我们就有了一台永动机，因为我们可以用被升高的重物来做别的事。也就是说，倘若升高重物后机器精确地回到它原来的状态，而且它是完全自给的——即它未曾从外界接受能量（像布鲁斯的积木）来升高这个重物。

一种非常简单的起重机如图4-1所示。这台起重机升起三倍重的重物。我们把三个单位的重量放在一个秤盘里，在另一个秤盘里放一个单位重量。不过，为了使它实际工作起来，我们得从左边的盘里挪走一点重量。反之，如果我们从右边的盘里取去一点重量，我们也可以靠降低三个单位重量来升高一个单位重量。当然我们知道，对于任何实际的起重机，都必须加一点额外的作用才能使它运作。我们暂且不考虑这一点。理想的机器不需要任何额外的作用，虽然它们在实际中不存在。我们实际使用的机器在某个意义上可以几乎是可逆的：即，如果它会靠降低一个单位重量来升高三个单位重量，那么它也会靠降低三个单位重量来将近似一个单位重量升高到原来的高度。

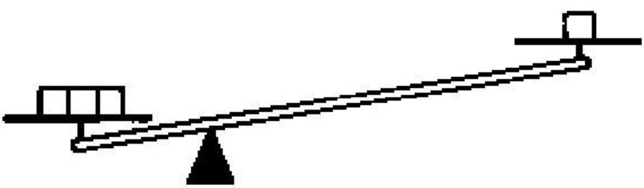


图4-1　简单的起重机械

我们想象存在着两种不同的机器：一种是不可逆的，它包括一切实际的机器；另一种是可逆的，这当然是实际上做不到的，不论我们怎样细心地设计轴承、杠杆等。不过，我们还是假设有这样一台可逆的机器

存在，它使一个单位重量（1牛顿或任何别的单位）降低一个单位距离，同时使三个单位重量升高。把这台可逆的机器叫做机器A。假设这台特别的可逆机把三个单位的重量升高一段距离x。再假设我们有另一台机器，机器B，它不一定是可逆的，它也把一个单位重量降低一个单位距离，但是它使三个单位的重量升高的距离是y。我们现在可以证明y不大于x；这就是说，不可能建造一台机器，它能把重物提升到一个比可逆机所能提升到的更高的高度。我们来看为什么。假设y大于x。我们取一个单位重量，用机器B把这一个单位重量降低一个单位高度，这使三个单位重量升高一个距离y。然后我们可以把这个重量从y降到x，获得了白给的能力，并用可逆机A逆向运转，把三个单位重量降低距离x，同时使一个单位重量升高一个单位高度。这样就把一个单位重量送回它原来的位置，而使两台机器再次处于初始的备用状态！因此如果y大于x，我们就会有永动机了，而我们已假定这是不可能的。只要假定永动机不可能，我们就推导出y不会高于x，因此在一切可以设计出来的机器中，可逆机是最好的。

我们还可以看到，一切可逆机必定把重物升高到刚好相同的高度。假设B也是一台可逆机。当然，y不高于x的论证现在也和以前一样成立，但是现在我们也可以把论证的方向反过来，使用次序倒过来的机制以证明x不高于y。这个做法很值得注意，因为它允许我们分析不同的机器把某个东西升高的高度，而不必考察其内部机制。我们立刻就知道：如果某人制造了一组极其精巧的杠杆，靠把一个单位的重量降低一个单位距离以把三个单位的重量提高一段距离，把它和一个做同样工作的基本上可逆的简单杠杆相比较，这个人的机器并不会把重物升得更高，也许还低一些。如果他的机器是可逆的，我们也精确知道它会把重物升多高。总结一下：每一台可逆机，不论它如何运作，它将质量为1kg的东西降低1米以升高质量为3kg的重物，总是把质量为3kg重物升高到同一距离x。显然这是一条很有用的普遍定律。下一个问题当然是，x是多少？

假设我们有一台可逆机，它将要在3对1的情况下升高一个距离x。我们把3个篮球放在一个固定不动的多层货架上，如图4-2所示（每个图的最右边）。另一个篮球放在比地面高1米的平台上。这台机器可以靠把一个球降低1米来升高3个球。现在我们这样安排：准备装3个球的升降台（紧紧贴在固定货架的左边）有一层底板和两层架子，其间隔刚好是x，而且装着球的固定货架的间隔也是x（图（a））。首先我们把球从固定货架上水平地滚到升降台的架子上（图（b）），我们假设这不用花费能量，因为并没有改变球的高度。然后可逆机开始运作：它把单个球降到地板上，这使升降台升高一个高度x（图（c））。既然我们对架

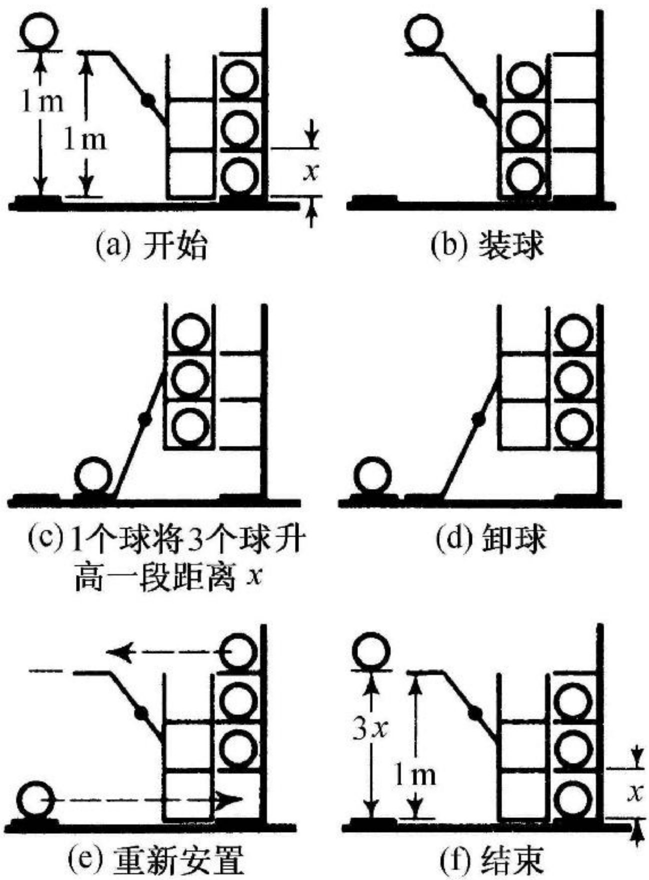


图4-2　一台可逆机

子做了巧妙的安排，因此这些球再次和货架的格子相平。于是我们把球再卸到货架上来（图（d））；把球卸下之后，我们就可以设法把机器恢复到初始状态了。现在我们有3个球在上面三层货架上，有1个球在地板上。但是奇妙的是，从另一个观点看，我们根本没有升高其中的两个球，因为毕竟第二层架子和第三层架子上原来就有球。最终的净效果是把一个球升高了一个距离3x。现在，如果3x超过1米，我们就可以降低这个球以使机器回到初始状态（图（f）），而让机器再度运行了。因此3x不能超过1米，因为如果3x超过1米，我们就可以实现永动机。同样，我们可以证明1米不能超过3x，这只要使整个机器反向运转就行了，因为它是一台可逆机。因此3x既不大于也不小于1米，于是我们只通过论证就发现了定律x＝1/3米。显然它可以推广为以下这样：质量为1kg的重物下降一段距离以运转一台可逆机，那么这台机器将把质量为pkg的重物升高上述距离的p分之一。表示这个结果的另一种说法是，3kg乘以升高的高度（在我们的问题中是x）等于1kg乘以下降的高度（在我们的问题中是1米）。如果我们取所有的重量，将它们乘以它们现在高出地板的高度求和，然后让机器运转，再把所有的重量乘以其高度求和，得到的前后结果不会有变化。（这个例子里我们只使一个重物

升高。我们必须把它推广为我们使一个重物下降时能使几个不同的重物升高的情形，但这不难。）

我们把重量乘高度之和叫做重力势能——一个物体由于它相对于地球的空间关系而拥有的能量。于是，只要我们离地球不太远（位置很高时重力会变弱），重力势能的公式是

$$\text{一个物体的重力势能} = \text{重量} \times \text{高度} \quad (4.3)$$

这条推理思路非常优美。惟一的问题是，也许它不是真实的（毕竟大自然的行为并不是非得遵照我们的思路不可）。例如，也许永动机实际上是可能的呢？！某些前提假设可能是错的，或者我们在推理过程中可能犯错误，因此检验总是必需的。事实上，实验证明它是对的。

如果一个物体的能量同相对于别的物体的位置有关，这种能量的一般名称就叫做势能。当然，在我们这种涉及重力的情况下，我们管它叫重力势能。如果在问题中我们是克服电力而不是克服重力做功，如果我们是用许多杠杆来“举起”电荷使它离开别的电荷，那里包含的能量就叫做电势能。普遍的原则是，这种能量的变化是力乘上这个力推过的距离，而且这也是一般的能量变化：

能量的变化＝力×这个力作用下所经过的距离（4.4）随着课程的进展，我们将遇到别的种种势能。

能量守恒原理对于在许多情况下推断会发生什么事是非常有用的。在中学里我们学过许多关于不同用途的滑轮和杠杆的定律，我们现在会看出所有这些“定律”都是一回事，因此就用不着死背75条规则来解决一道问题了。一个简单例子是图4-3所示的光滑斜面，很巧，它是一个边长为3、4、5的三角形。我们把质量为1kg的重物用一个滑轮挂在斜面上，滑轮的另一面是一个质量为W的重物。我们想要知道W必须是多大才能和斜面上质量为1kg的重物平衡。怎么解这个问题呢？如果它们刚好平衡，那就是可逆的，可上可下，我们可以考虑下述情况。初始时（图（a））质量为1kg的重物在斜面底部而W在顶端。当W以可逆的方式落下去后，情况变为1kg重物在顶端而W则从原先的位置往下落了斜面长度的距离（图（b）），或5米。1kg的物体只升高了3米而W则下降了5米。因此W＝3/5kg。注意我们是从能量守恒推出这个结果来的，而不是从力的分解。但是，强中更有强中手，我们还可以用一个更高明的方法来推出这个结果，这个方法是荷兰数学家斯蒂文发现的，刻在他的墓碑上。图4-4说明这个重物必须是3/5kg，因为这条由圆球组成的链子不转动。很明显链条的下部自己和自己平衡，因此一边的5个圆球的拉力必须和另一边的3个圆球的拉力相平衡，或按照三角形上面两条边的边长之比。你看，一瞧这个图，就知道W必须是3/5kg。（如果在你的墓碑上有一个像这样的墓志铭，你准干得不错。）

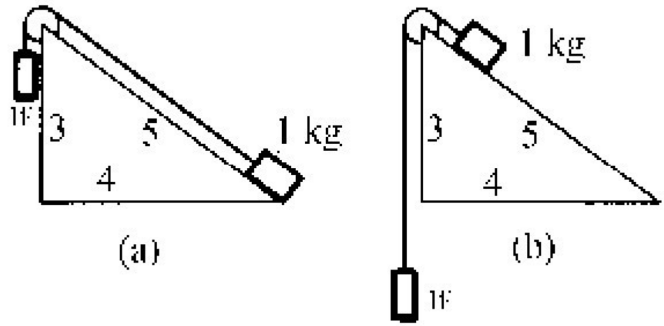


图4-3　斜面

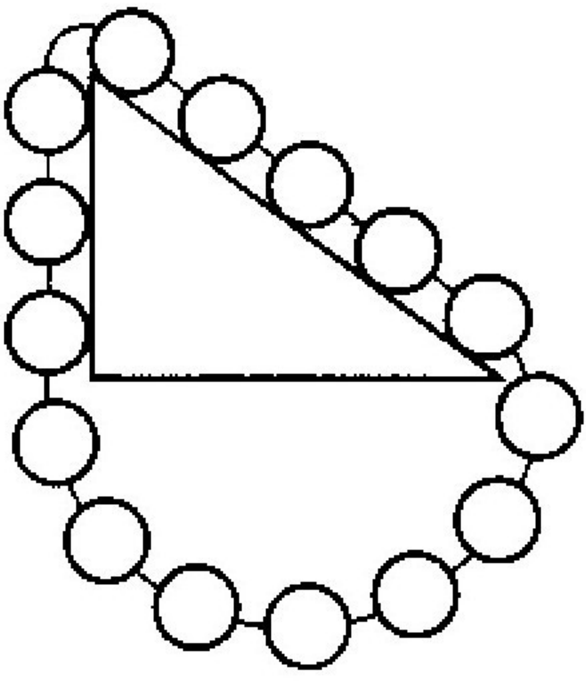


图4-4　斯蒂文的墓志铭

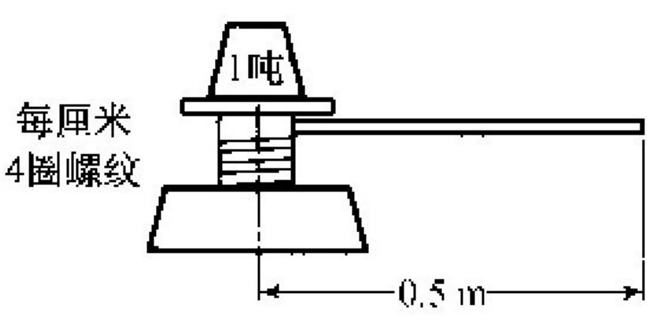


图4-5　螺旋千斤顶

现在我们用一个更复杂的问题，图4-5所示的螺旋千斤顶，来说明能量原理。用一根半米长的扳手来扳动螺旋，螺旋的螺纹每厘米4圈。为了顶起1吨的重物，问扳手上要用多大的力？如果我们要把这个1吨的重物顶起比方说1厘米，我们必须把扳手转4圈。它转一圈所走的路程大约是3.15米。于是扳手一共得走12.6米，这样我们求出扳手上要用的力是0.8千克力左右。这是能量守恒的结果。用一些滑轮之类的东西，我们就可以用一个质量为0.8kg的小重物把力加到扳手端点上把1吨的重物顶起来。

现在看一个更复杂一些的例子，如图4-6所示。一根棍子，长2米，一端支起来。在棍子中点有一个质量为30kg的重物，在离支撑点半米处有一个质量为50kg的重物。忽略棍子本身的重量，要使棍子平衡，我们在棍子的另一端要加多大的提举力？如果我们在棍端处加一滑轮，在滑轮上挂一重物。这个重物W得是多大才能平衡？我们想象这个重物下落一段任意距离——为了我们自己方便，假设它下降4厘米。两个负载重物升高多少？中点上升2厘米，而离固定支撑点四分之一棍长处的点则上升1厘米。因此，高度乘重量之和不变的原理告诉我们，质量W乘4厘米向下，加30千克乘2厘米向上，加50千克乘1厘米向上，其和必须为零：

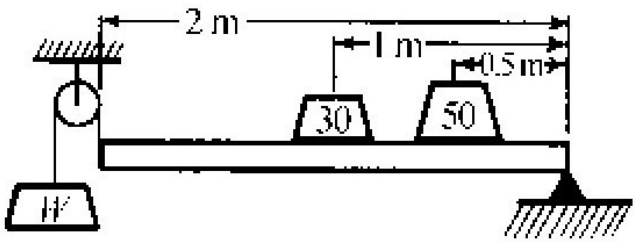


图4-6　一端吊起来的荷重杆

$$-4W+2\times 30+1\times 50=0\text{，}W=27.5\text{kg。}\quad (4.5)$$

于是我们必须用一个质量为27.5千克的重物使棍子平衡。用这种方法，我们就得出“平衡”的定律——复杂的桥梁结构等的静力学。这种方法叫做虚功原理，因为为了用这个方法我们必须设想系统有一个小移动——尽管它实际上并没有移动甚至根本不能移动。我们用很小的假想运动以运用能量守恒原理。

4-3 动能

为了说明另一种形式的能量，我们考虑一个单摆（图4-7）。如果我们把摆拉向一边再放开，它就来回摆动。在这种运动中，从任何一个端点摆向中心时它的高度都降低。势能到哪儿去了？当摆在底部最低位置时重力势能会消失；但是，摆会再次爬上去。可见，重力势能一定变成了另一种能量形式。显然，摆是依靠它的运动才能再次爬上去的，因此在摆到达最低点时重力势能转变为某种别的形式了。

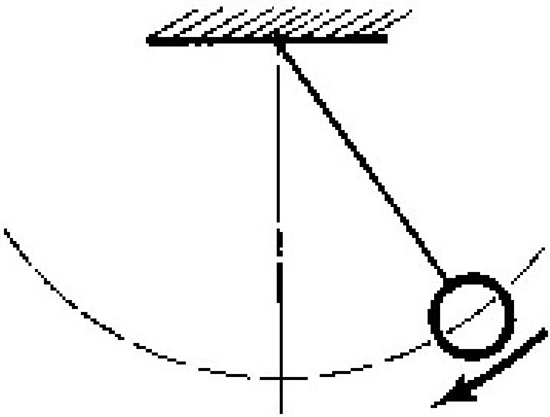


图4-7 摆

我们必须得出运动能量的一个公式。回忆我们对可逆机的论证，容易看出，摆在底部的运动必定拥有一定量的能量，是它允许摆上升一定的高度，它与摆升高的机制和路程无关。因此我们有一个这两种能量之间的等当公式，它同我们前面对孩子的积木写出的公式有点相像。我们有另一个表示能量的形式，不难得出这个形式。摆在底部的动能等于重量乘摆在其速度下能到达的高度，动能＝$W\times h$。现在需要的是根据某个规则得出这个高度（它必定与物体的运动有关）的公式。如果我们以某个速度使一物体开始运动，比方说垂直上抛，它将到达一定的高度；我们还不知道这个高度是多少，但是它必定依赖于速度，它们之间有一个公式。于是为了求出一个以速率v运动的物体的动能的公式，我们必须算出它能到达的高度，再乘以物体的重量。我们下面不久就会发现，动能的公式可以写成

$$动能=Wv^2/2g。\quad (4.6)$$

当然，运动具有能量这一点同我们是在一个重力场中并无关系。它同运动是怎样产生的无关。这是一个适用于各种速度的普遍公式。（4.3）式和（4.6）式都是近似公式：前一公式在高度很大时不正确，因为高度很高时重力减弱；后一公式则在速度高时有相对论性修正。但

是，当我们最后得到能量的精确公式时，能量守恒定律仍是正确的。

4-4　能量的其他形式

我们可以继续用这个办法说明能量还以其他的形式存在。首先考虑弹性能。如果我们把一根弹簧往下拉，我们必须做一些功，因为我们把它拉下来之后，就可以用它将重物拉到高处去。因此弹簧在被拉伸的状态下具有做功的本领。如果这时我们来计算重量乘高度之和，是不能验证它们不变的——我们必须加进一些别的项以考虑弹簧是处于紧张状态的事实。弹性能就是弹簧处于被拉伸状态的能量。它有多大？如果我们放开它，在弹簧经过平衡点时，弹性能就变换为动能，能量在弹簧的压缩和伸长与运动的动能之间来回变换。（这里也有一些重力势能进出，不过只要我们愿意，我们可以让弹簧平躺着做实验。）它一直这样往复振动，直到能量损失——啊！我们前面一直在玩一个小花招，说什么加一个微小的重量使物体动起来，或者机器是可逆的，或它们永远运动下去等，但是我们能够看到，这些东西最终都要停下来。当弹簧不再上下振动时，能量到哪里去了呢？这就引入了能量的另一种形式：热能。

在弹簧和杠杆内部有由大量原子组成的晶体。你可以试着以极度的细心和技巧安排各种部件来进行调整，使得当一个东西在另一个东西上滚动时，原子不做任何晃动。但是这必须非常、非常细心。通常当一个东西滚动时，由于材料的不规则性，都会发生撞击和跳动，原子就开始在内部乱动。于是那部分能量就失踪了；我们发现在运动慢下来以后原子在内部以随机和混乱的方式乱动。不错，这时仍然有动能，但是它不是和看得见的运动相联系。似乎全是些梦话！我们怎么知道这时还有动能？原来，用温度计你可以发现，弹簧或杠杆事实上比以前更热了，这确实表明动能有一定数量的增加。我们把这种形式的能量叫做热能，不过我们知道其实它并不是一种新形式，它就是动能——内部运动的动能。（我们在大尺度上对物质所做的一切实验都有一个困难，即不能真正演示能量守恒，不能实际做出可逆机，因为我们每次使一大块材料运动，原子都不会绝对不受扰动，因此总会有一定数量的无规运动进入原子系统。我们看不见它，但是我们可以用温度计等测出它。）

能量还有许多别的形式，当然，眼下还不能对它们做更详细的描述。这包括电能，它同电荷的排斥和吸引有关。还有辐射能，光的能量，我们知道它是电能的一个形式，因为光可以表示为电磁场的振动。还有化学能，化学反应中释放出的能量。化学能是物质中原子相互吸引的能量，弹性能也是如此，因此，弹性能实际上在某些方面和化学能相像。现在的理解是，化学能包括两部分，一是原子内部电子的动能，因此化学能的一部分是动能，其余的是电子和质子相互作用的电能，因此另一部分是电能。接下来该是核能了，与原子核内的粒子的安置有关的能量，我们有核能的公式，但是我们不掌握它的基本定律。我们知道它不是电能，不是引力能，也不单纯是化学能，但是我们不知道它究竟是什么。看来它是一种新的能量形式。最后，与相对论相联系，有一个对动能公式的修正（你也可以用你喜欢的任何别的说法来称呼它），使动

能和另一个叫做质能的东西结合在一起。一个物体仅仅由于它存在就具有能量。如果有一个正电子和一个电子，静静地呆着什么也不做，不必考虑重力，不必考虑别的东西，然后它们走到一起就消失了，释放出一定量的辐射能，其数量是可以算出来的。我们需要知道的只是物体的质量。它与物体是什么无关——我们使两个粒子消失，而得到一定量的能量。它的公式是爱因斯坦首先发现的：$E=mc^2$。

从我们的讨论明显看出，能量守恒定律对我们分析问题是极其有用的，这在前面几个例子中已经表明了，在这些例子中用不着知道一切公式。如果我们已经有了各种能量的公式，我们就可以分析哪些过程会发生而不必深入探究细节。所以我们对守恒定律是非常感兴趣的。问题自然就来了：在物理学中还有哪些别的守恒定律？还有另外两条与能量守恒相似的守恒定律。一条叫做动量守恒，另一条叫做角动量守恒。后面对它们会有更多的讨论。归根结底，我们并没有对守恒定律有深刻的理解。我们不理解能量守恒。我们并不把能量理解为一定大小的小团。你可能听说过，光子是以小团的形式出现，一个光子的能量是普朗克常量乘频率。这是对的，但是由于光的频率可以是任意值，没有任何定律说能量必须是某个确定的大小。不像丹尼斯的积木，能量可以有任何量值，至少今天是这样理解的。因此目前我们并不把能量理解为对某种东西点数，而只是把它看作一个数学量，它是一个抽象和相当古怪的东西。在量子力学里，发现能量守恒原来和世界的另一个重要属性有十分紧密的联系，这个属性就是事物不依赖于绝对时间。我们可以在一个给定时刻安排做一个实验并且做完它，然后在晚些时候再做相同的实验，它们的结果将完全相同。这是否严格正确，我们还不知道。如果我们假定它正确，加上量子力学的一些原理，我们就可以导出能量守恒定律。这是一件相当微妙和有趣的事，不容易解释。别的守恒定律也与时空性质有联系。动量守恒在量子力学中是和下述命题相联系的：在什么地方做实验没有什么关系，结果总是相同。最后，就像空间无关性与动量守恒相联系、时间无关性与能量守恒相联系一样，如果我们转动实验仪器的方向，也不会造成实验结果的差别，世界对角度取向的这种不变性与角动量守恒相联系。除了这几条守恒定律之外，还有另外三条守恒定律，迄今为止我们可以说它们是精确的。这三条守恒定律理解起来要简单得多，因为它们的本性属于数积木那一类。

这三条守恒定律的第一条是电荷守恒定律，它的意义只不过是，数一下有多少个正电荷和负电荷，将正电荷的数目减去负电荷的数目，结果的数字永远不变。你可以用一个负电荷抵消一个正电荷，但是你不能生成正电荷对负电荷的净余额。另外两条定律和这一条类似，其中一条叫做重子数守恒。有一些奇怪的粒子，例如中子和质子，它们叫做重子。在自然界的任何反应中，如果数一数有多少个重子进入一个过程，那么过程结束时的重子的数目[14]将相同。另一条守恒律是轻子数守恒。属于轻子的粒子是电子、μ子和中微子。还有一个电子的反粒子，即正电子，其轻子数为-1。数一数参加一个反应的轻子的总数，表明反应开始前和结束后的数目不变，至少迄今所知是这样。

这就是六条守恒定律，其中三条是微妙的，涉及空间和时间，另外三条是简单的——从它们只是对某种东西计数的意义上说。

关于能量守恒，应当指出的是，可用的能量是另一个问题——海水的原子有大量的振动，因为海水有一定的温度，但是如果不从别的什么地方取得能量，就不能把它们聚集为一个确定方向的运动。这就是说，虽然我们知道能量是守恒的，但是人类可以利用的能量却不是那么容易保存。确定有多少能量可供利用的定律叫做热力学定律，它们包括一个关于不可逆热力学过程的概念，叫做熵。

最后，我们说一说今天我们可以从哪里获得能量供应的问题。我们的能量来源是太阳、雨水、煤、铀和氢。雨水是太阳造成的，煤也是，因此所有这些都来自太阳。虽然能量是守恒的，但是大自然似乎对节约能量并不感兴趣；她从太阳释放出大量的能量，但是其中只有二十亿分之一落到地球上。大自然有能量守恒，但是并不真正在乎它；她向四面八方散发着巨大数量的能量。我们已经从铀获得了能量；我们也可以从氢得到能量，不过现在还只是在爆炸和危险的条件下。如果它可以在热核反应中受到控制，那么可以证明，每秒从大约10升水中得到的能量就等于整个美国的发电功率，也就是说，每分钟用600升水，就有了足够的燃料来供应今天美国所用的全部电能！因此，该由物理学家想办法，把我们从对能量的需要中解放出来。这是可以做到的。



第五章　万有引力理论

5-1　行星运动

在这一章里我们将讨论人类心智做出的最深远的推广之一。在赞美人类心智的同时，我们应该抽点时间对大自然顶礼膜拜，表示我们对她的肃然敬畏，因为她能如此彻底而且普遍地遵从像引力定律这样一个简洁优美的原理。引力定律是什么？它说，宇宙中每个物体都吸引每一个别的物体，任何两个物体之间的引力正比于每个物体的质量，反比于它们之间距离的平方。这句话在数学上可以表示为下面的式子：

$$F = Gmm'/r^2.$$

在这个定律的基础上再加上下述事实，即一个物体在一个力的作用下会在力的方向上得到加速，加速度的大小反比于该物体的质量，那就万事俱备了，一个天分够高的数学家就能够演绎出这两条原理的全部结论。但是，既然我并不假定你有这样高的天分，我们将较详细地讨论这些结论，而不只是留给你两条空洞的原理。我们将简短地叙述发现引力定律的故事，讨论它的某些结论，它在历史上的作用，这样一条定律遗留下来的未解之谜，以及爱因斯坦对这一定律的一些改进；我们还要讨论这条定律与其他物理定律的关系。所有这些在一章里是说不完的，但是这些题目会在恰当的时候在随后各章里讨论。

整个故事从古人观察行星在恒星之间的穿行、并最后推断出行星是围绕太阳运行（哥白尼后来又重新发现了这个事实）开始。行星究竟是怎样环绕太阳运行，究竟是以什么样的运动环绕太阳运行，那还需要做更多的工作。15世纪初，就行星是否真正环绕太阳运行，曾有过激烈的争论。第谷·布拉赫（TychoBrache）有一个不同于古人提出的任何观点的想法：这些关于行星运动本性的争论，只有在足够精确地测量出行星在天空的实际位置后，才能最好地解决。只有当测量精确地显示出行星是怎样运动的之后，才有可能建立这个或那个观点。这是一个非同小可的想法——为了发现某种东西，去做一些细致的实验要比引用深刻的哲学论据强。在这个想法指引下，第谷·布拉赫在他位于哥本哈根附近的汶岛上的天文台里多年观察行星的位置。他编制了卷帙浩繁的星表，在第谷去世后，数学家开普勒研究了这些星表。开普勒从这些数据发现了几条非常漂亮、卓越而又简单的关于行星运动的定律。

5-2　开普勒定律

开普勒首先发现，每个行星是沿一条叫做椭圆的曲线环绕太阳运行的，太阳是这个椭圆的一个焦点。一个椭圆并不仅仅是个卵形的东西，而是一条非常明确而精密的曲线，可以用两个揿钉（每个焦点上各揿一个）、一条线和一支铅笔画出来；用更数学的话来说，椭圆是与两个固定点（焦点）的距离之和为常数的所有的点的轨迹。或者，如果你愿意的话，也可以说它是一个压扁的圆（图5-1）。

开普勒第二个观察结果是，行星不是以均匀的速率环绕太阳运行，它们离太阳越近，就运动得越快，离太阳越远，就运动得越慢，精确地说是这样：在任何相继的两个时刻，比方说相隔一星期，观察一颗行星，并且对每个观测位置画出到行星的径矢[15]。行星在这个星期里所经过的轨道上的一段弧与两条径矢围出一块平面面积，即图5-2中涂阴影的区域。如果在离太阳更远的那一部分轨道上（那里行星运行得更慢）也进行两次类似的相隔一星期的观测，那么用类似方法围出来的面积与前一观测中围出的面积完全相同。因此，按照开普勒第二定律，每个行星的轨道速度使径矢在相等的时间里扫过相等的面积。

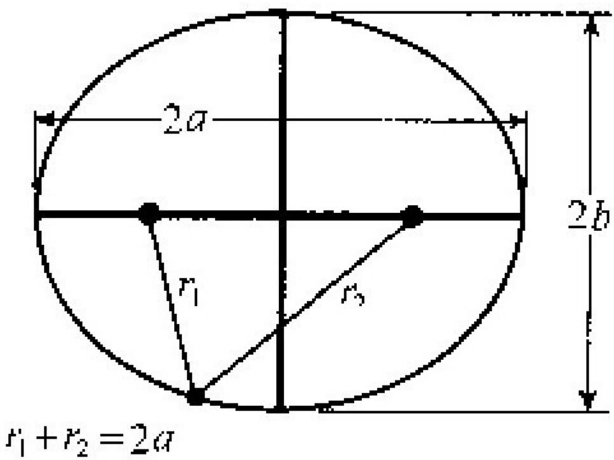


图5-1　椭圆

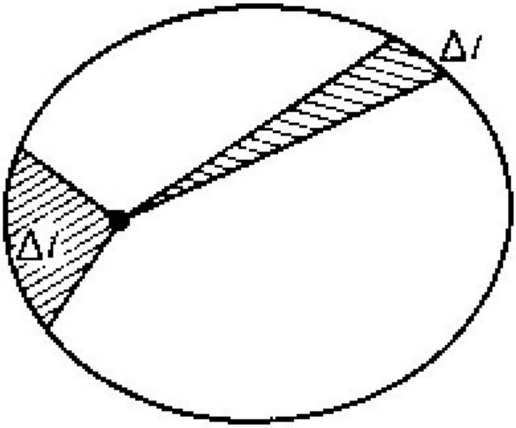


图5-2　开普勒面积定律

开普勒第三定律发现得要晚得多；这条定律和前两条属于不同的类型，因为它不只是涉及单个行星，而是把各个行星的运动联系起来。这条定律说，在比较任何两个行星的轨道周期和轨道大小时，周期正比于轨道大小的3/2次方。在这句话里，周期是指行星绕其轨道走完整整一圈的时间间隔，而轨道大小则是椭圆轨道的最大直径（更专门的术语叫长轴）。更简单些，如果行星是按圆形轨道运行（它们近似就是这样的），那么绕圆周走一圈所需的时间同直径（或半径）的3/2次方成正比。于是开普勒的三条定律是：

1.每个行星沿一条椭圆轨道绕太阳运行，太阳是椭圆的一个焦点。

2.从太阳到行星的径矢在相等的时间间隔里扫过相等的面积。

3.任何两个行星的周期的平方正比于它们各自的轨道的半长轴的立方：$T \sim a^{3/2}$。

5-3 动力学的发展

当开普勒发现这些定律时，伽利略正在研究运动定律。问题是，是什么使行星绕太阳运转？（当时有一个理论是，行星绕太阳运转是因为后面有看不见的天使在推它们，他们扑动着翅膀推着行星前进。你将看到，这个理论现在有一些修正，人们发现，为了使行星转圈儿，看不见的天使必须向一个不同的方向飞，而且他们没有翅膀。在其他方面，新理论倒是与原来的理论多少有些相似！）伽利略发现了一个有关运动的非常值得注意的事实，它对理解开普勒的诸定律是必不可少的，那就是惯性原理——如果有个东西在运动，不和别的东西接触并且完全不受干扰，它就将以匀速沿直线永远这样运动下去。（为什么它保持直线匀速运动？我们不知道，但它就是这样。）

牛顿进一步明确了这个想法，他说改变物体运动的惟一方法是施之以力。如果物体运动得越来越快，就一定有一个力施加在运动方向上。另一方面，如果物体的运动改变到一个新的方向，那它就受到了一个侧向力的作用。于是牛顿就加进来一个观念：要改变物体运动的速率或方向，就需要一个力。例如，把一块石头拴在绳子上，让它做圆周运动，就需要有一个力把它保持在圆周上。我们必须拉住绳子。事实上，运动定律是，力产生的加速度与质量成反比，或力正比于质量乘加速度。一个东西的质量越大，为了产生一个给定的加速度，所需要的力越大。（质量可以这样测量：把不同的石头系在同一条绳子的末端，使它们以同样的速度做同样大小的圆周运动。这时会发现，所需要的力的大小不同，质量大的物体所需要的力也大。）从这些考虑得出的一个高明见解是，为了将一颗行星保持在它的轨道上，并不需要一个切向力（天使并非一定要在切向飞行），因为行星在这个方向上会做惯性运动。如果根本没有东西打搅它，行星会沿着切线方向的直线飞走。但是实际运动是偏离这条如果没有力作用物体本应沿之运动的直线的，这一偏离基本上与运动的方向垂直，而不是在运动的方向上。换句话说，由于惯性原理，控制一颗行星环绕太阳运动所需的力不是一个环绕太阳的力，而是一个向着太阳的力。（如果有一个力向着太阳，太阳理所当然可能就是这个天使！）

5-4　牛顿引力定律

牛顿凭着他对运动理论的透彻理解，觉察到太阳可能是支配行星的运动的力的起源和关键所在。他向自己证明（也许不久我们也将能证明），在相等的时间里扫过相等的面积这一事实，正是全部偏离都精确地在径向这个命题的一个准确无误的标志，换句话说，面积定律是所有的力都精确地指向太阳这一观念的直接结果。

然后，通过分析开普勒第三定律，能够证明，行星离太阳越远，所受的力越弱。比较离太阳距离不同的两个行星，分析表明，它们所受的力反比于各自离太阳的距离的平方。把这两条定律结合起来，牛顿就得出结论，必定存在这样一个力，它与距离的平方成反比，而方向沿着两个物体的连线。

牛顿是一个对事物中的普遍性有很强的感觉的人，他当然会假设，这个关系不只是适用于太阳拉住行星，而是可以更普遍地应用。例如，当时已经知道，木星也有多个卫星环绕着它转动，一如月亮环绕地球运行。牛顿认定，每个行星都用一个力拉住自己的卫星。他已经知道把我们拉在地球上的力，因此他提出，这是一个普遍存在的力——每个物体都吸引任何一个别的物体。

下一个问题是，地球拉我们的力是否和它拉月球的力是“同一种”力，也就是说，是否与距离的平方成反比。如果地面上的一个物体，当它在静止状态下被放开时，在第一秒钟里往下掉4.9米，那么在同一时间里，月球下掉多少呢？我们也许会说月球根本不下掉。但是，如果没有对月球的拉力，它会沿直线飞走，但它并不飞走而是环绕地球做圆周运动，因此实际上它是从如果根本没有力作用时本应在的位置上往里掉了。从月球轨道的半径（它大约是38万千米）和它环绕地球转一圈的时间（大约29天），我们可以计算月球在其轨道上1秒钟走多远，然后可以算出它1秒下掉多少。[16]最后求出的这个距离大约是1秒钟里1/8厘米。它和平方反比律符合得很好，因为地球的半径是6400千米，如果一个离地球中心6400千米的物体在第一秒钟里下掉4.9米，那么距离为38万千米，或60倍远地方的物体，只应当下掉4.9米的1/3600，这大约就是1/8厘米。牛顿想用与此相似的计算来检验他的引力理论，他非常仔细地进行了计算，但是却发现差异很大，以致他认为这个理论与事实矛盾，因而没有发表他的结果。6年后，一次对地球大小的新测量表明，天文学家们以前所用的月地距离是错的。牛顿听说后，用正确的数据再次进行了计算，得到了非常符合一致的结果。

月球“往下掉”的观念会引起一些混乱，因为你看到，它丝毫没有和我们更靠近。这个观念很有意思，值得进一步解释。我们说的月球往下掉，是在这个意义上说的，那就是它从没有力作用时本应遵循的那条直线上掉出来。让我们举一个地面上的例子。一个在地球表面附近松开手

的物体在第一秒钟里将下掉4.9米。一个水平射出的物体也将下降4.9米；尽管它在水平方向运动，它还是在相同的时间里下降相同的4.9米。图5-3是一台用来演示这一情况的仪器。在水平轨道上有一个小球，它将要被向前推一段小距离。在同一高度上有另一个小球，它将要垂直下落。有一个电开关控制它们，使得当第一个小球离开水平轨道的那一刻，第二个小球也松开往下掉。它们在同一个时刻到达同一个高度，这一点可以由人们亲眼看到两个球在半空中相撞而得到证明。像子弹这样的物体，水平射出时，1秒钟里可以走很长的路程——也许有600米——但它仍将下降4.9米，即使它是在水平方向上瞄准射出的。如果我们射出的子弹越来越快，会发生什么情况呢？别忘了地球的表面是弯曲的。如果我们射出的子弹足够快，那么当它下降4.9米时，也许正好是在地面之上它原来的高度上。怎么会这样呢？它仍然在下掉，但是因为地球也向下弯，因此它就“环绕着”地球往下掉。问题是，它在1秒钟里要走多远，才使地球也比地平线低4.9米？在图5-4中我们看到半径为6400千米的地球及其切线，如果没有外力的话子弹本应沿这条切线直线飞行。现在，我们应用几何学中的一条奇妙的定理：垂直于直径的半弦是它所分割的直径的两段的比例中项，我们看出，所走的水平距离是下落的高度4.9米和地球直径12800千米的比例中项。0.0049×12800的平方根很接近于8千米。于是我们看到，如果子弹的速率为每秒8千米，那么它就将以每秒4.9米的相同速率不停地向地球下落，但是永远不会更接近地球，因为地球也在不断地弯曲离开子弹。正是这个原因，使加加林以大约每秒8千米的速率把自己保持在太空中走了40000千米，环绕地球一圈。（实际上他走的路程更长一些，因为他飞行的高度比地面高一些。）

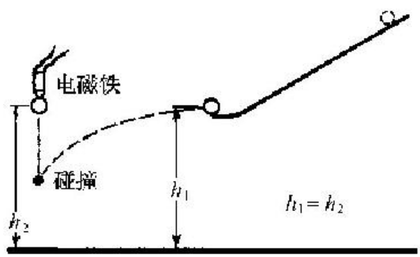


图5-3　演示垂直运动与水平运动互不相关的装置

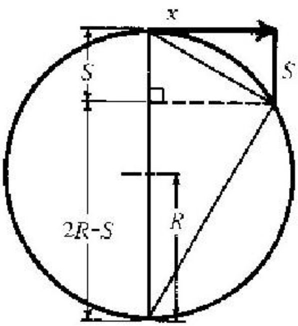


图5-4　圆周运动的向心加速度。由平面几何，x/S＝（2R-S）/x≈2R/x，其

中R是地球的半径，6400千米，x是每秒“水平通过”的距离；S是每秒“下落”的距离4.9米

任何对一条新定律的伟大发现，只有当它的“产出”大于我们对它的“投入”时，这个发现才是有用的。牛顿是用开普勒的第二和第三定律推出他的引力定律的，那么，他预言了一些什么呢？首先，他对月球运动的分析就是一个预言，因为它把地面上物体的下落同月球环绕地球的运动联系起来。其次，这个轨道是一个椭圆吗？我们在后面一章里将会看到，怎么能够精确地计算运动，并且的确能够证明它是一个椭圆，[17]因此就无须用额外的事实来解释开普勒第一定律了。于是牛顿做出了他第一个有力的预言。

引力定律解释了许多以前不理解的现象。例如月亮对地球的引力引起潮汐，这在那时还是一个谜。月亮把它下面的水拉起来并造成涨潮——这人们以前也曾想到过，但是他们没有牛顿聪明，因此他们以为每天应该只有一次涨潮。其理由是，月亮把它下方的水向上拉，造成一次潮涨和一次潮落，由于地球在月亮下面自转，就使一个地方的潮水每24个小时涨落一次。实际情况是潮水每12个小时涨落一次。另一个学派则主张，涨潮应当出现在地球的另一侧，他们的理由是，月亮把地球从水里拖出来！这两个理论都是错的。实际的机制是，月球对地球和对水的引力在中心处“平衡”，但是更靠近月球的水受到的引力大于平均值，离月球更远的水受到的引力小于平均值。而且，水可以流动而更刚硬的地球则不能。真实的情况是这两件事的结合。

我们说的“平衡”是什么意思？什么东西平衡？如果月球把整个地球拉向它，为什么地球不干脆“向上”掉到月球上去？这是因为地球玩着和月球一样的魔术，它也在环绕一点转动，这一点在地球内部，但不在地心。并不是月球绕地球转动，而是地球和月球两个都在绕一个中心位置转动，每一个都在向这个共同的中心位置下落，如图5-5所示。这个环绕共同中心的运动是平衡掉每一个的下落的原因。因此地球并不是沿一直线运动，而是做圆周运动。地球上离月球远的一面的水没有得到平衡，因为月球的吸引力在那里比在地心处弱，在地心处，月球的吸引力刚好和“离心力”平衡。这一不平衡就使水上升，离开地心。在靠近月球的一面，月球的吸引力更强，不平衡是向着空间相反的方向，但仍然是离开地心。净结果就是每天有两次涨潮。

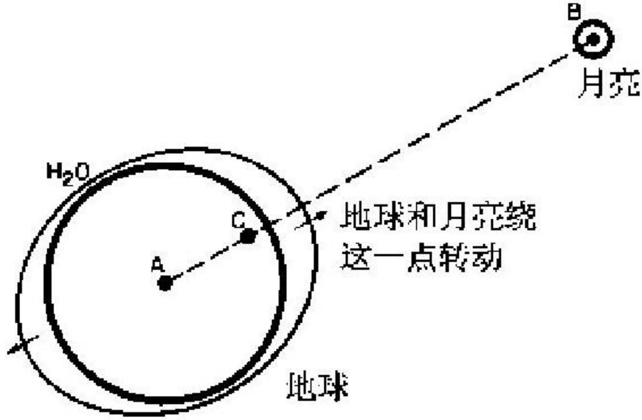


图5-5　引起潮汐现象的地月系统

5-5 万有引力

当我们理解了引力以后，还能理解哪些别的东西呢？每个人都知道地球是圆的。为什么它是圆的？这很容易回答，它是引力的结果。我们能够理解地球是圆的，其原因仅仅是因为每个物体都吸引别的每个物体，因此地球尽可能把自己吸引在一起。如果我们更深入一步，那么地球并不是精确的球形，因为它在自转，这带来了离心效应，这个效应在赤道附近倾向于和重力抗衡。最终表明，地球应当是椭圆形的，我们甚至得到了这个椭圆的正确形状。于是，我们仅仅从引力定律，就能推出太阳、月亮和地球应当接近于球形。

用引力定律我们还能做些什么？如果我们看一看木星的月亮，我们就能了解有关它们围绕木星运行的一切情况。顺便说一下，曾经有过一个涉及木星月亮的困难，值得在此一提。罗默（Roemer）非常仔细地研究过这些卫星，他注意到这些月亮有时看来超前于预定的时刻出现，有时则落后于预定的时刻。（人们通过长期的观测并求出这些月亮环绕木星一圈各自平均所需的时间，就可以得出它们出现的时刻表。）当木星特别接近地球时，它们超前；当木星远离地球时，它们滞后。这是一件按照引力定律非常难以解释的事——事实上，如果找不到别的解释的话，它就将枪毙这个美妙的理论。一条定律，只要在一个它本应适用的地方不适用，它就是错的。但是解释这个矛盾的理由非常简单而又漂亮：看到木星的月亮需要一些时间，因为光从木星来到地球需要时间。当木星离地球较近时，这个时间短一些；当木星离地球较远时，这个时间长一些。这就是这些月亮随着它们是接近还是远离地球，而稍微超前或稍微推迟出现的原因。这个现象表明光不是即时传播的，并且提供了光速的第一个估计值。这是在1676年完成的。[18]

如果所有的行星都相互作用，那么，控制比方说木星环绕太阳运行的力就不只是来自太阳的力；还有来自比方说土星的引力。这个力实际上并不强，因为太阳的质量比土星大得多，但是毕竟有一点引力，因此木星的轨道就应当不是一个完美的椭圆，事实上的确不是；它稍微偏离正确的椭圆轨道，在它的周围“晃动”。这样的运动显得更复杂一些。人们曾试图在引力定律的基础上分析木星、土星和天王星的运动。把这些行星中每一个对每一个别的行星的影响都计算进来，看看是否仅仅用引力定律就能完全理解这些行星运动中的小偏差和不规则性。嘿，你瞧，对木星和土星，一切都很好，但是天王星有点不对头。它的行为很特别。它不是在一个精确的椭圆轨道上运行，但这是可以理解的，因为有木星和土星对它的吸引。不过，即使考虑了这些吸引，天王星仍然不按正确的方式运行，因此引力定律面临被推翻的危险，这种可能性不能排除。两个人，英国的亚当斯（Adams）和法国的勒威耶（Leverrier），各自独立地想到了另一种可能性：也许还存在另一颗昏暗和难以看见的行星，这颗行星人们还从来没有观察到过。这个行星N可能对天王星有引力作用。他们计算了这样一颗行星应当在什么地方，才能引起所观察

到的扰动。他们各自写信给有关的天文台，说：“先生们，把你们的望远镜对准天上某个某个地方，你将看到一颗新行星。”至于他们是否注意这个信息，那常常就看你写信给什么人了。勒威耶写信去的那个天文台注意了这个信息，他们观察了，行星N就在那里！于是另一个天文台也迅速地在随后几天里进行了观察，也看到了这颗新行星。

这个发现表明，牛顿的定律在太阳系内是绝对正确的；但是它们能够被推广到离我们最近的行星这个相对说来比较小的距离范围之外吗？第一个考验是这个问题：恒星也像行星一样互相吸引吗？我们在双星里看到了它们互相吸引的确凿证据。图5-6表示一对双星——两颗非常靠近的恒星（图中还有第三颗星，使我们可以判断照片没有转过一个角度）。图中也显示了这几颗星在几年后的样子。我们看到，相对于那颗“固定”的恒星，双星的轴已经转过了一个角度，也就是说，两颗星互相环绕着旋转。它们是在按照牛顿定律旋转吗？对一个这样的双星系统中两颗星的相对位置的仔细测量结果示于图5-7中。在图中我们看到一个漂亮的椭圆，这一测量于1862年开始，一直持续到1904年（到现在它一定又转了一圈了）。一切都与牛顿定律相符，除了天狼星A不在焦点上。为什么会这样？因为椭圆的平面不在“天空平面”上。我们不是垂直于轨道平面来看的，当斜着看一个椭圆时，它仍是一个椭圆，但是它的焦点不再在原地了。于是我们能够按照引力定律的要求来分析相互环绕运动的双星。

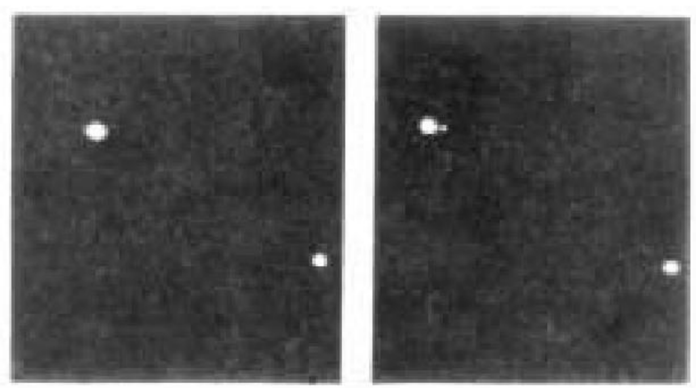


图5-6　一个双星系统

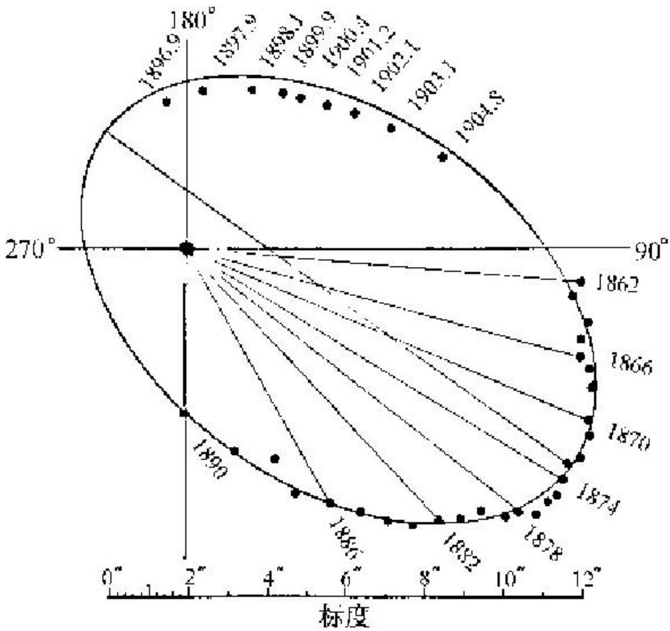


图5-7　天狼星B相对于天狼星A的轨道

图5-8表明，引力定律甚至在更大的距离上也是正确的。如果有人看不出引力在这里起作用，那他就没有脑子。这个图显示的是天空中最美丽的事物之一——一个球状星团。所有的点都是恒星。虽然它们看起来像是向着中心密集地挤成一团，其实这是由于我们的仪器的分辨率不足所致。实际上，即使是最中心部分的恒星之间的距离也是非常大的，而且它们极少碰撞。内部的恒星比外部多，而且越往外越少。显然，这些恒星之间有一个吸引力。很清楚，在这样巨大的尺度上（也许是太阳系大小的10万倍）也存在着引力。让我们走得更远，看一整个星系，如图5-9。这个星系的形状表明它的物质有一个明显的要凝聚成团的倾向。当然我们不能证明这里的引力定律也是精确的平方反比律，只能说明，在这样巨大的尺度上，仍然有一个吸引作用，把整个星系保持在一起。有人也许会说，“嗯，这一切都很巧妙，但是为什么它不聚集成一个球呢？”因为它在旋转并且具有角动量，这是它收缩时所不能放弃的；它必然主要是顺着转轴的方向收缩，收缩为一个平面。（顺便说一句，如果你要找一个好问题，那么，星系的旋臂如何形成，是什么决定了这些星系的形状等，都还没有解决。）但是清楚的是，星系的形状应归因于引力，虽然星系结构的复杂还不允许我们进行全面的分析。一个星系的尺度大致是5万到10万光年，而地球到太阳的距离只是八又三分之一光分，因此你可以看到这些尺度是多么巨大。



图5-8　一个球状星团



图5-9　一个星系

在还要大得多的尺度上看来引力也存在，如图5-10所示，图中显示许多“小东西”聚成一团。这是星系团，就像恒星构成星团一样。因此星系在这样的距离上也相互吸引，聚集成团。也许引力甚至在几千万光年的距离上也存在；就我们今日所知，看来引力永远以与距离平方成反比的方式向外伸展。

从引力定律我们不仅能够理解星云，还能够对恒星的起源有一些想

法。如果我们有一片很大的尘埃和气体云，如图5-11所示，尘埃碎片相互之间的引力作用可能使它们形成小团块。图中有一些依稀可辨的小黑斑，它们可能是尘埃和气体聚集的开始，由于它们之间的引力，它们开始形成星体。我们是否曾看到过一颗恒星的形成，还是一个有争论的问题。图5-12是认为我们曾看到过的一个证据。图的左边是1947年拍的一张气体区域的照片，其中有几个星体；右边是仅仅7年后拍的同一区域的另外一张照片，它增加了两个新的亮点。是气体聚集得足够多、引力作用得足够强、把它聚集成了一个足够大的球，使得星体的核反应在其内部开始发生，把它变成了一颗星体吗？也许是，也许不是。在仅仅7年里，我们就能看到一颗星把自己变成可见的，这是不近情理的；而居然一下子看到两个，那就更不可能了！



图5-10　一个星系团



图5-11　一团星际尘埃云

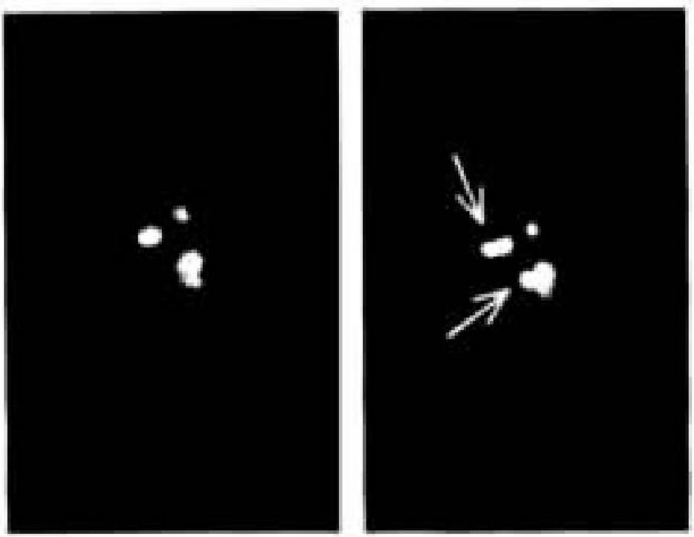


图5-12　新星的形成

5-6 卡文迪什实验

因此，引力伸展到极大的距离上。但是，如果在任何两个物体之间都有一个力，那么我们就应该能够测量出我们周围的两个物体之间的力。为什么我们不能取一个铅球和一个大理石球，观察大理石球怎样向铅球滚过去，而必须观察两颗恒星互相环绕着旋转呢？在这样简单的方式下做这样一个实验的困难在于，这个力非常微弱或者纤细。必须极其小心地来做实验，这意味着要把仪器封装在真空里，确保它不带电，等等；这样才能测量出这个力。这个测量是由卡文迪什（Cavendish）首次做的，他用的仪器如图5-13所示。这个实验首次表明了两个固定的大铅球和两个较小的铅球之间的直接作用力，这两个小铅球位于一根横杆的两端，横杆用一根非常纤细、叫做扭丝的金属丝悬挂起来。通过测量这根扭丝扭转的角度，可以测量出这个力的强度，从而验证它是与距离的平方成反比，并测定它的大小。于是，就可以精确确定公式

$$F = Gmm'/r^2$$

中的系数G，因为所有的质量和距离都是已知的。你会说，“对地球我们早就知道这个力了。”是的，但是我们不知道地球的质量。

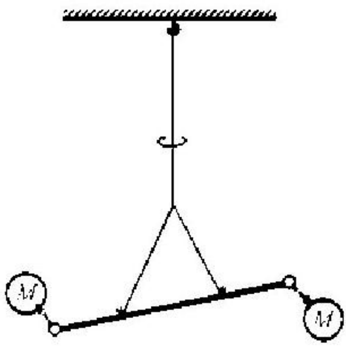


图5-13　卡文迪什用来验证小物体之间的万有引力定律和测量引力常数G值的仪器的简图

从这个实验知道G并且知道重力的大小之后，我们就可以间接知道地球的质量有多大！这个实验曾经被称为“称量地球”的实验。卡文迪什宣称他是在称量地球，但是事实上他测量的是引力定律中的G。这是惟一的能够测量地球质量的方法。最后得到G的数值是

$$6.670 \times 10^{-11}\text{牛顿}\cdot\text{米}^2/\text{千克}^2\text{。}$$

引力理论的伟大成就在科学史上所产生的重大影响，是怎样估计也不过分的。试把这个定律的简单明晰同早年流行的不完整的知识、同当

时无休无止的争论和悖论、混乱和缺乏证据做一比较吧，想想这一事实：一切月亮、行星和恒星都受这样一条简单定律的支配，而且人居然能够理解它，并推导出行星应当怎样运动！这是科学在后来的年代里得到成功的原因，因为它给了我们希望，别的自然现象也可能有这样简单漂亮的定律。

5-7　引力是什么

但是这条定律真是这么简单么？它的机制是什么？我们所做的全部只是描述地球如何绕太阳转，但是我们并没有说是什么使它这样运行。牛顿对此没有做任何假设；他只满足于找出它做什么，而没有深入研究它的机制。从那时以来，没有人给出过任何成功的机制。这是物理定律的特征，它们都具有这种抽象的特性。能量守恒定律是关于一些必须计算出来并且加在一起的一些量的一条定理，而并没有触及其机制；同样，力学中那些重要定律也是定量的数学定律，我们不知道它们的机制。为什么我们能够用数学来描述大自然，而不了解它们背后的机制？没人知道。我们必须继续沿着这条道路前进，因为用这种方法我们发现了更多的东西。

人们曾经为引力设想过多种机制。其中有一种值得在此说一下，许多人曾一再想到过它。起初，“发现”它的人曾非常激动和高兴，但很快就发现它是不正确的。它最早是在1750年前后被提出的。假定在空间里有许多粒子以很高的速度在一切方向上运动，并且在穿过物质时只被少量地吸收。当它们被地球吸收时，它们给地球一个冲量。但是，由于各个方向上的粒子数目一样多，这些冲量都平衡掉了。但是当有太阳在附近时，那些穿过太阳飞向地球的粒子被太阳吸收了一部分，因此来自太阳的粒子就比来自其他方向的粒子要少一些。于是，地球就感觉到有一个指向太阳的净冲量，并且不需要多少时间就可以看出，它与距离的平方成反比——因为当距离变化时太阳对我们所张的立体角与距离的平方成反比。这个机制有什么毛病呢？它包含了一些不正确的新结论。这个特殊的想法有以下的麻烦：地球在环绕太阳运动时，撞上的来自其前方的粒子要比来自其后方的粒子多（当你在雨中奔跑时，打在你脸上的雨滴要比打在后脑上的雨滴多！）。因此给予地球的冲量来自前方的更多，地球将会感到一个对其运动的阻力，并且将在其轨道上逐渐慢下来。可以算出经过多长时间地球就会由于这个阻力停下来，结果是地球能够保持在它的轨道上的时间不是很长，因此这种机制不成立。从来还没有提出过一种机制，它既能说明引力，又不预言一些不存在的现象。

下面我们将讨论引力和其他各种力可能有的关系。现在还没有一种用别的力来说明引力的解释。它不是电或诸如此类的什么东西的一个方面，所以我们没有什么解释。但是，引力和别的力是十分相似的，注意到它们的相似之处是有趣的。例如，两个带电体之间的电力和引力定律很相像，电力等于一个带负号的常数乘上两个电荷之积，并且反比于距离的平方。它是在相反的方向——同号相斥。但是两条定律都含有同样的与距离的函数关系，这难道不引人注目吗？也许引力和电力的关系要比我们想象的密切得多。曾经有过许多想要把引力和电力统一起来的企图；所谓“统一场论”只不过是这些企图中特别优美的一个；但是，在比较引力和电力时，最有趣的事是这两个力的相对强度。任何包括它们二者的理论必须也能导出引力的大小。

如果我们用某种自然单位，取两个电子（自然界中的普遍的电荷）之间的电斥力和它们之间由于其质量而产生的引力来比较，我们可以测量电斥力和万有引力的比值。这个比值与距离无关，是自然界的一个基本常数。其大小如图5-14所示。两个电子之间的引力与电斥力之比是 $1:4\times10^{42}$！现在的问题是，这样巨大的一个数字从何而来？这个数字不是像一个跳蚤的体积与地球的体积之比那样只是一个偶然的数字。我们比较的是同一事物电子的两个自然的侧面。这个大得难以置信的数字是一个自然常数，因此它包含了自然界中某种深层的东西。这样一个惊人的数字能从哪里来呢？有人说，总有一天我们将会找到一个“宇宙方程”，这个方程的一个根就是这个数。很难找到这样一个方程，它的自然根是这样大的一个数。别的可能性也有人想到过；其中之一是把它同宇宙的年龄联系起来。显然，我们必须在某个地方找到另一个大数。那么，我们指的是以年为单位的宇宙年龄吗？不是，因为年不是一个“自然”单位；它是人设计出来的。作为某个自然单位的一个例子，让我们考虑光穿越一个质子的时间，10^{-24}秒。如果我们把这个时间同宇宙的年龄 2×10^{10}年相比较，其比值为10^{-42}。它后面有同样个数的零，因此曾有人提出，引力常数同宇宙年龄有关。如果情况是这样，引力常数就会随时间变化，因为随着宇宙年龄变大，宇宙年龄和光穿越质子的时间的比值也逐渐增大。引力常数正在随时间变化是可能的吗？当然，这种变化是如此之小，很难确定。

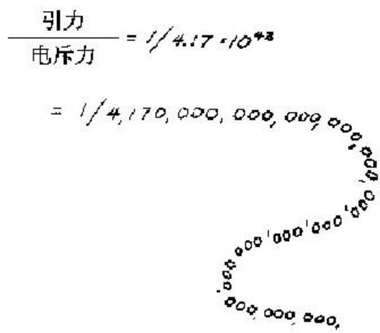


图5-14　两个电子之间的电力作用和引力作用的相对强度。

我们能够想到的一个检验方法是确定在过去10^9年里这种变化可能产生的效应，这段时间大约是从地球上最早有生命出现到现在的时间，是宇宙年龄的十分之一。在这段时间里，引力常数可能已增大大约10%。人们发现，如果考虑太阳的结构——太阳物质的重量和其内部产生辐射能的速率之间的平衡，我们就可以推出，如果引力增强10%，那么太阳的亮度的增大要比10%大得多——与引力常数的6次方成正比！如果计算当引力变化时地球轨道怎么变化，我们发现地球那时更靠近太阳。把这两个因素综合在一起，地球的温度将比现今高大约100摄氏度，所有的水不会在海洋里，而是以水蒸气的形式存在于空气中，因此生命无从在海洋中发端。因此现在我们不相信引力常数随宇宙的年龄变化。但是，我们刚才给出的这样一些论据并不是很有说服力的，因此争论还没有完全结束。

引力正比于质量是一个事实，而质量从根本上说是惯性的量度，即拉住一个物体做圆周运动的困难程度的量度。因此若有两个物体，一个轻一个重，由于引力作用在同一个圆轨道上以同样的速率围绕一个更大的物体运行，这时这两个物体将保持在一起，由于做圆周运动需要一个向心力，较大的质量所需要的力也较大。这就是说，对于质量较大的物体，它所受的引力也正好以恰当的比例增强，使得两个物体仍将一起做圆周运动。如果一个物体原来是在另一个里面，它将仍然在它里面；这是一个全面的平衡。于是，加加林或季托夫发现宇宙飞船舱内的东西都是“失重”的；如果他们碰巧掉下比方说一支粉笔，这支粉笔会和整个宇宙飞船以完全相同的方式环绕地球运行，因此它看起来就会悬浮在他们面前的空中。这个力以很高的精度精确地与质量成正比，这一点是非常有趣的；因为如果不是这样，就会有某些效应，依靠这些效应质量（惯性质量）就会不同于重量（引力质量）。人们已经以很高的精度用实验检验过，不存在这样的效应；这个实验是厄特沃斯（Eötvös）于1909年首次做的，不久前由迪克（Dicke）以更高的精度再次做过。对于试验过的一切材料，质量和重量在10^{-9}的精度内精确地成比例。这是一个值得称道的实验。

5-8　引力和相对论

另一个值得讨论的题目是爱因斯坦对牛顿引力定律的修正。尽管牛顿引力定律带来了这么大的激动人心的成就，但是它并不正确！爱因斯坦把相对论引进来，对它进行了修正。按照牛顿的看法，引力效应是瞬时的，这就是说，如果我们移动一个质量，我们将立即感觉到一个新的力，因为这个质量已在新的位置上了；用这种手段，我们可以用无穷大的速率发送信号。爱因斯坦提出了种种论据，表明我们不能以快于光速的速率发送信号，因此引力定律一定是错了。在将延迟考虑进来而对牛顿引力定律进行修正之后，我们得到一条新定律，叫做爱因斯坦引力定律。这条新定律的一个容易理解的特征是：在爱因斯坦的相对论中，任何具有能量的东西也具有质量——这里质量的意义是，它能受到引力的吸引。即使是光，因为它有能量，它也有一个“质量”。当一束含有能量的光经过太阳附近时，它会受到太阳的吸引，于是光不走直线，而是被偏转。例如，在日蚀时，太阳周围的星星看起来好像是从如果太阳不在那里时它本应在的位置移开了，这个现象已经被观察到了。

最后，让我们对引力和别的物理理论做一些比较。近年来我们已经发现，所有的物质都是由微小粒子组成的，并且自然界中存在几种相互作用，诸如核力等。这些核力或电力中，还未曾发现有哪一个可以用来解释引力。自然界的量子力学一面，还没有被搬到引力上来。当尺度小到我们需要考虑量子效应时，引力效应却是如此之弱，还不需要发展引力的量子理论。另一方面，为了我们的各个物理理论的内在的一致性，重要的是看一看牛顿引力定律在修正为爱因斯坦的定律后，能否进一步修正到与量子力学的不确定原理相容。这个修正现在尚未完成。



第六章　量子行为

6-1　原子力学

在前面几章里，我们讨论了为理解光——或一般地说电磁辐射——的大部分重要现象所必需的一些基本概念。（我们留下了几个特殊的题目到来年再讲，具体地说就是光密介质的折射率和全内反射的理论。）我们讨论过的这些内容叫做电磁波的“经典理论”，大量事实表明，它非常适合描述自然界的许多效应。我们暂时还不必为光的能量是成团地或以“光子”形式出现而操心。

我们想讨论的下一个问题是比较大块物质的行为——比方说它们的力学性质或热性质。在讨论这些性质时，我们会发现，“经典理论”（或较老的理论）几乎立即就失效了，因为物质实际上是由原子大小的粒子组成的。然而，我们仍将只讨论事物的经典方面，因为这是我们用我们学过的经典力学惟一能理解的部分。但是我们不会太成功。我们将发现，物质的情况与光的情况不同，在这里我们很快就会遇到困难。当然，我们可以继续避开原子效应，但是我们不这么做，我们要在这里插进来一段短短的插曲，描述物质的量子行为的基本观念，即原子物理学的量子观念，使你对我们暂时要回避的东西有一点概念。因为我们不得不暂时回避一些重要的题目，而这些题目我们将来不可避免地要接触到。

因此，我们现在来简单地介绍一下量子力学，但是实际上深入研究这个题目只能留待以后进行。

“量子力学”是对物质行为直至其细节的详细描述，特别是对发生在原子尺度上的事件的详细描述。在非常小的尺度上，事物的行为一点也不像你有直接经验的任何东西。它们的行为不像一个波，不像一个粒子，不像一团云，不像一个弹子球，不像一个挂在弹簧上的重物，不像你曾看见过的任何东西。

牛顿曾认为光是由粒子组成的，然而我们看到，人们发现它的行为像一个波。但是后来（20世纪初）又发现，光的行为有时的确像是粒子。在历史上曾以为电子的行为像一个粒子，但是这时又发现，在许多方面它的行为像一个波。因此实际上它既不像粒子，也不像波。现在我们干脆放弃这种把它与别的东西比拟的做法，我们说：“它和哪一个都不像。”

不过，好在还有一点——电子的行为和光的行为彼此很相像。所有的微观客体（电子、质子、中子、光子等）的量子行为都相同；它们都

是“粒子波”（或者你愿意叫的任何名称）。因此我们所学的关于电子（我们将用它做例子）的性质也可以应用于所有的“粒子”，包括光的“粒子”——光子。

在20世纪的头25年中，逐渐积累了关于原子和小尺度上行为的知识，它们给出了微小客体的行为的一些迹象，也引起了越来越多的混乱，这些混乱终于在1926年和1927年由薛定谔、海森伯和玻恩解决了。他们终于获得了对微小尺度上物质的行为的一个贯彻一致的描述。我们在这一章里要研究这种描述的主要特点。

由于原子行为同日常经验是如此的不同，人们很难习惯于它，不论是新手还是有经验的物理学家，都觉得它奇特和神秘。即使是专家也不能照他们所想的方式理解它，而这是完全合理的，因为一切人类的直接经验和直觉都是关于大的客体的。我们知道大的客体的行为将是怎样，但是小尺度事物的行为偏偏不是这样。因此我们不得不用一种抽象或想象的方式来学习它，而不是与我们的直接经验相联系。

在这一章里我们将直截了当地讨论以其最奇特的方式表现的这种神秘行为的基本要素。我们挑选一种不可能（绝对不可能！）以任何经典方式解释的一种现象来考察，这种现象中却隐藏了量子力学的核心内容。实际上，它包含了那个独一无二的秘密。我们不能从“解释”它的行为机制的意义上来说明这个秘密，我们只能告诉你它的行为是怎样的。在告诉你它的行为是怎样的同时，我们就告诉了你全部量子力学的基本特色。

6-2 用子弹做的实验

为了试图理解电子的量子力学行为，我们将在一个特殊的实验装置中，把它们的行为同更熟悉的像子弹这样的粒子的行为和像水波这样的波的行为做一对比。我们首先考虑子弹在图6-1所示的实验装置中的行为。我们有一挺机枪射出一连串子弹。它不是一支好枪，因为它将子弹随机地撒在一个相当大的角度范围内，如图所示。在机枪前面有一堵墙（用钢板做成），墙上开有两个孔，孔的大小刚好足以让子弹通过。墙外有一道后障（比方说一道厚木墙），它将“吸收”打上去的子弹。在墙的前方有一个叫“子弹探测器”的东西，它可以是一个装有沙子的箱子。任何进入探测器的子弹将被留在那里积累起来。我们可以随时出空箱子，清点它所捕获的子弹的数目。探测器可以沿着图中的x方向上下移动。用这套装置，我们可以用实验求得下述问题的答案：“一颗子弹穿过墙上的孔后到达后障上离中心为x处的概率是多少？”首先，你应该认识到我们谈的是概率，因为我们不能肯定任何一颗特定的子弹会到达什么地方。一颗碰巧打到一个孔上的子弹可能会从孔的边缘弹开，最后打在任何一个地方。所谓“概率”我们指的是一颗子弹打到探测器的机会，它可以通过在某一时间内打中探测器的子弹的数目除以在这段时间内打到后障上的子弹总数来量度。或者，如果我们假定在测量过程中机枪总是以同样的快慢射击，那么我们所要的概率就正比于在某个标准的时间间隔内到达这个探测器的子弹数目。

为了当前的目的，我们要想象一个有些理想化的实验，这个实验中的子弹不是真正的子弹，而是不会破裂的子弹——它们不会裂成两半。在实验中我们发现，子弹总是整颗地到达，我们在探测器中找到的总是一颗完整的子弹。如果使机枪射击的速率非常慢，我们发现，在任何给定的时刻，要么没有任何子弹到达，要么有一颗而且只有一颗——正好一颗——子弹到达后障。而且，整颗子弹的大小肯定与机枪射击的速率无关。我们可以说：“子弹永远以相同的一颗一颗的形式到达。”我们用探测器测量到的是一整颗子弹到达的概率。而且我们测量这个概率和x的函数关系。用这套仪器进行的测量结果（我们还没有做过这个实验，实际上我们是在想象这个结果）画在图6-1（c）上。在图中我们把概率轴指向右方而x轴则在垂直方向，使x方向与仪器图的x方向相合。我们把这个概率叫做P_{12}，因为子弹可能是穿过孔1过来的，也可能是穿过孔2过来的。P_{12}之值在图的中央附近大而当x很大时变小，这一点你不会感到惊奇。

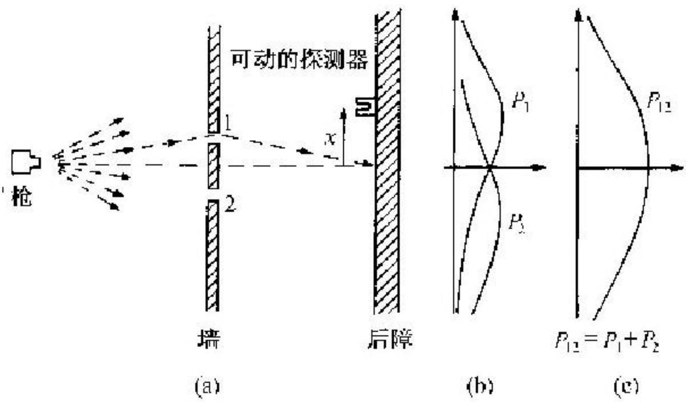


图6-1　用子弹做的干涉实验

不过你可能会感到奇怪，为什么P_{12}在$x=0$处有极大值。如果我们盖上孔2再做实验，然后盖上孔1再做一次，我们就会理解这一点。当孔2被盖上时，子弹只能穿过孔1，我们就得到图6-1（b）中用P_1标示的曲线。正如你期望的，P_1的极大值位于枪口和孔1的连线所在的x值上。当孔1被关闭时，我们得到图中所画的对称的曲线P_2。P_2是通过孔2的子弹的概率分布。比较图6-1（b）和图6-1（c），我们求得一个重要的结果：

$$P_{12}=P_1+P_2 \quad (6.1)$$

概率简单地相加。两个孔都打开的效应是单独打开每个孔的效应之和。我们将把这个结果叫做“没有干涉”，其理由下面就会明白。关于子弹就讲这些。它们整颗地出现，并且它们到达的概率不呈现干涉。

6-3 用波做的实验

现在我们来考虑一个用水波做的实验。实验仪器示于图6-2中。我们有一个浅水槽，里面盛有水。一个标有“波源”字样的小物体用马达带动上下振动，产生圆形的波。波源的右边仍是一堵带两个孔的墙，墙外是第二道墙，为了使问题尽量简单化，我们假设这道墙是一个“吸收体”，因此到达它的波不发生反射。这可以用逐渐上升的“沙滩”做到。在沙滩前面放一个探测器，和以前一样，它可以沿x方向移动。这里的探测器是一个测量波动的强度的仪器。你可以想象它是一个测量波动高度的装置，但是它的刻度是正比于实际高度的平方而校准的，因此它的读数正比于波的强度。于是，我们的探测器的读数正比于波携带的能量——或更确切地说，正比于能量被带到探测器的速率。

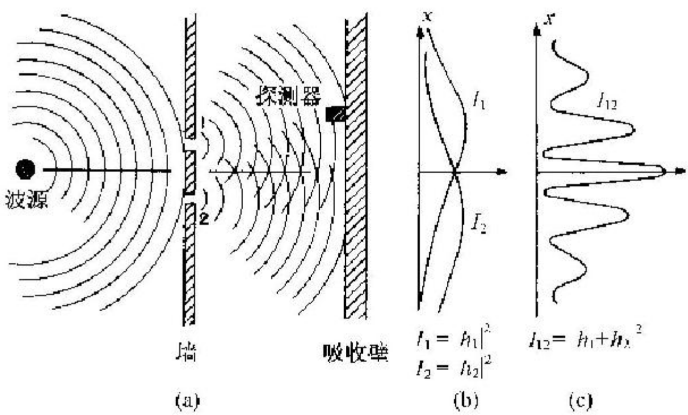


图6-2　用水波做的干涉实验

用我们这套波动实验仪器，该注意的第一件事是，波动的强度可以是任意大小。如果波源只做很小的运动，那么在探测器处只有一点点波动。波源的运动更大时，探测器处波的强度更强。波的强度可以有任意的值。我们不认为波的强度有任何“颗粒性”。

现在我们来测量不同x值处波的强度（保持波源一直作同样的振动）。我们得到图6-2（c）中标有I_{12}的样子很有趣的曲线。

在我们研究电磁波的干涉时，已经知道了这种图样是怎样产生出来的。在那里，我们观察到原来的波在两个小孔处发生衍射，从每个孔有新的圆形波传播出来。如果我们每次盖上一个孔，测量吸收体上的强度分布，我们将求得图6-2（b）所示的很简单的强度分布曲线。I_1是关上孔2时穿过孔1的波的强度分布，而I_2是关上孔1时穿过孔2的波的强度分布。

两个孔都打开时观察到的强度分布I_{12}肯定不是I_1与I_2之和。我们说

这里发生了两个波的“干涉”。在某些地方，两个波“同相”，波峰加在一起得出一个大的振幅，从而给出一个大的强度，I_{12}在这些地方有极大值。我们说这两个波在这些地方发生“相长干涉”。只要探测器到一个孔的距离比探测器到另一个孔的距离大（或小）整数个波长，就会发生这样的相长干涉。

在两个波“反相”（相位差π）到达的那些地方，探测器上的合成波动的振幅是两个波振幅之差。两个波“相消干涉”，我们得到波的强度的一个很低的值。只要孔1到探测器的距离与孔2到探测器的距离相差奇数个半波长，我们就预期强度的值很低。图6-2中I_{12}曲线的最小值所在就对应于那些发生相消干涉的地方。

你会记得，I_1，I2和I_{12}之间的定量关系可以用以下的方式表示：在探测器处来自孔1的水波的瞬时高度可以写成$h1e^{iwt}$（的实部），其中振幅h_1一般是一个复数。强度正比于高度的均方值，或者在使用复数的情况下，正比于$|h_1|^2$。同样，来自孔2的水波的瞬时高度为h_2e^{iwt}，其强度正比于$|h2|^2$。当两个孔都打开时，两个波的高度相加给出合成波的高度（h_1+h_2）e^{iwt}和强度$|h_1+h_2|^2$。对于我们现在的目的，可以忽略掉比例常数，于是得到两个波发生干涉时适用的关系：

$$I_1=|h_1|^2，I_2=|h_2|^2，I_{12}=|h_1+h_2|^2。\quad (6.2)$$

你会注意到，这个结果同用子弹得出的结果（6.1）式很不相同。展开$|h_1+h_2|^2$，我们得到

$$|h_1+h_2|^2=|h_1|^2+|h_2|^2+2|h_1||h_2|\cos\delta。\quad (6.3)$$

其中δ是h_1和h_2之间的相位差。上式用强度可以写成（6.4）式中最后一项是“干涉项”。对水波我们就讨论到这里。其强度值可以是任意大小，并且它表现出干涉。

$$I_{12}=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\delta。\quad (6.4)$$

6-4　用电子做的实验

我们现在来想象一个用电子做的类似的实验。其原理图见图6-3。我们制造一把电子枪，它由一根用电流加热的钨丝和环绕它的一个带孔的小金属盒构成。如果钨丝相对于金属盒带负电压，钨丝发射的电子将被加速向盒壁，有一些将穿过小孔跑出来。所有从电子枪跑出来的电子具有（近似）相同的能量。在电子枪的前面又是一堵墙（只不过是一片薄金属板），上面有两个小孔。墙外是另一块板，它将用作“后障”。后障前面放一个可移动的探测器。这个探测器可以是一个盖革计数器，或者一个与扬声器相连接的电子倍加管也许更好。

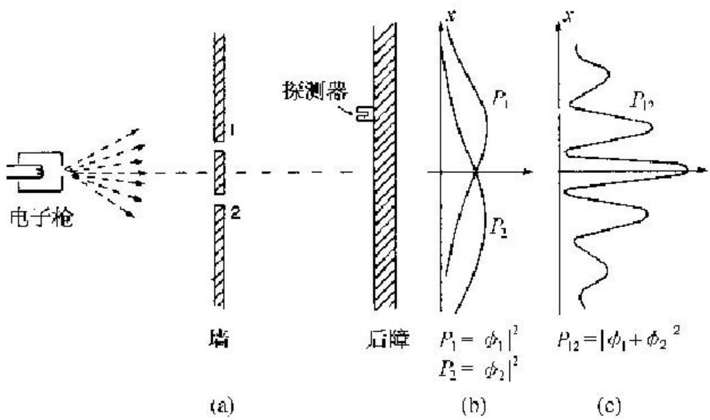


图6-3　用电子做的干涉实验

我得马上告诉你，你不要试着去做这样一个实验（虽然你可能已经做过我们前面描述的两个实验）。这个实验从来没有以我们刚才描述的形式做过。麻烦在于，为了显示出我们感兴趣的效应，仪器的尺度必须小到不可能做出来的程度。我们是在做一个“思想实验”，我们之所以选择这样做是因为它易于想象。我们知道将会获得的结果，因为已经做过许多别的实验，在那些实验中已选取了合适的尺寸和比例以显示我们要在下面描述的效应。

在电子实验中我们注意到的第一件事是，我们听到从探测器（即扬声器）发出的清晰的“喀哒”声。所有的“喀哒”声都相同，没有半个“喀哒”声。

我们还会注意到，“喀哒”声的出现很不规则，有点像这样：喀哒……喀哒喀哒……喀哒……喀哒……喀哒……喀哒喀哒……喀哒……等，就像你无疑听到过的盖革计数器工作时发出的声音一样。如果我们对足够长的时间里——比方说许多分钟里——听到的喀哒声进行计数，然后在另一个相等的时间间隔里再次进行同样的计数，我们会发现，两个数目非常相近。因此我们可以定义听到喀哒声的平均计数率（平均每

分钟听到多少次喀哒声）。

随着我们四下移动探测器，喀哒声出现的速率或快或慢，但是每一个喀哒声的大小（响度）永远相同。如果我们降低电子枪中钨丝的温度，喀哒声的出现速率就会慢下来，但是每次喀哒声的大小仍然和以前一样。我们还会注意到，如果我们在后障上放两个分开的探测器，那么一个或另一个探测器都会发出喀哒声，但是两个探测器决不会同时发喀哒声（除了有的时候两次喀哒声在时间上太接近，以致我们的耳朵感觉不出二者的间隔）。因此我们得出结论，到达后障的任何东西都是以“颗粒”形式到达的。所有的“颗粒”的大小都相同：只有整颗的“颗粒”到达，一次一颗。我们得说：“电子永远以完全一样的颗粒形式到达。”

正像我们用子弹做的实验一样，我们进而可以用实验求出下述问题的答案：“一个电子‘颗粒’在离中心的距离为x处到达后障的概率是多少？”同以前一样，保持电子枪的运作情况不变，观察喀哒声的快慢，我们就得到了相对概率。电子颗粒到达一个特定的x处的概率正比于在这个x处的喀哒声的平均计数率。

我们实验的结果是图6-3（c）中标有P_{12}的那条有趣的曲线。是的，电子的行为就是这样！

6-5 电子波的干涉

现在我们试着来分析图6-3中的曲线，看我们是否能理解电子的行为。我们要说的第一点是，既然电子是以颗粒形式到来的，那么每个颗粒，也可以叫一个电子，就要么穿过孔1要么穿过孔2到达后障。我们把这一点写成一个“命题”的形式：

命题A：每个电子要么穿过孔1，要么穿过孔2。

假定命题A成立，那么所有到达后障的电子可以分成两类：（1）穿过孔1的，（2）穿过孔2的。因此我们观察到的曲线一定是穿过孔1的电子的效应与穿过孔2的电子的效应之和。让我们用实验来检验这个想法。首先，我们对穿过孔1的电子进行测量。我们把孔2挡住，对探测器的喀哒声计数。从喀哒声的计数率，我们得到P_1。测量结果见图6-3（b）中标有P_1的曲线。这个结果看起来相当合理。用类似的方法，我们测量出穿过孔2而到达的电子的概率分布P_2。这个测量结果也画在图6-3（b）中。

两个孔都打开的情形下得到的结果P_{12}显然不是只打开一个孔时的概率分布P_1与P_2之和。同我们的水波实验类比，我们得说：“这里有干涉发生。”

$$\text{对于电子：} P_{12} \neq P_1 + P_2 \text{。} \quad (6.5)$$

怎么能发生这样的干涉呢？也许我们会说：“嗯，这可能意味着，电子颗粒要么穿过孔1要么穿过孔2的命题不成立，因为如果它成立，概率就应当相加。也许它们的运动方式更为复杂。它们裂开成两半并且……”但是不！它们不能分裂，它们永远以完整的颗粒的形式到达……“嗯，也许它们之中的某些穿过孔1，然后再穿过孔2兜回来，然后再兜几圈，或者沿某条其他的复杂路径……这样，关闭孔2，我们就改变了一个出发时穿过孔1的电子最后落到后障上的机会……”但是请注意！后障上存在着这样一些点，当两个孔都打开时只有很少的电子到达这些点，而如果关闭一个孔却有许多电子，因此关闭一个孔增大了来自另一孔的电子数目。不过，又请注意，在概率分布图样的中心处，P_{12}的大小要比P_1+P_2的两倍还大。这又好像是关闭一个孔就减小了来自另一孔的电子数目。要用电子沿复杂的路径行进的假设来解释这两种效应看来是困难的。

这一切都很神秘。你对它考虑得越多，它就显得越神秘。曾经炮制出许多理论，试图用单个电子沿复杂的路径穿过两个孔兜圈子来解释P_{12}曲线。它们之中没有一个成功。没有一个能够用P_1和P_2得出正确的P_{12}曲线。

可是，使人非常惊奇的是，把P_1和P_2同P_{12}联系起来的数学极为简

单。因为P_{12}曲线正好像图6-2中的I_{12}曲线，而它是简单的。在后障上发生的事情可以用两个叫ψ_1和ψ_2的复数描述（当然，它们是x的函数）。ψ_1的绝对值的平方给出只有孔1打开时的效应，即$P_1 = |\psi_1|^2$。只有孔2打开时的效应由ψ_2以同样的方式给出，即$P_2 = |\psi_2|^2$。而两个孔的联合效应正好是$P^{12} = |\psi_1 + \psi_2|^2$。它用的数学同我们在水波情况下用的数学相同！（难以看出，从电子沿着某条奇异的轨道来回穿越金属板的复杂运动怎么能得出如此简单的结果。）

我们的结论如下：电子以颗粒的形式到达，像粒子一样；而这些颗粒到达的概率分布则像是一个波的强度分布。正是在这个意义上，我们说“一个电子的行为有时像一个粒子，有时像一个波。”

顺便说一下，在我们讨论经典的波时，我们定义波的强度为波的振幅的平方的时间平均值，并且我们用复数作为一种简化分析用的数学技巧。但是在量子力学中我们发现，振幅必须用复数表示，单用实部不行。暂时这只是一个技术问题，因为公式看起来完全一样。

既然穿过双孔的到达概率这样简单（虽然它不等于$P_1 + P_2$），这实际上就是全部我们要说的了。但是，自然界的确按照这样的方式行事，这一事实包含了大量微妙之处。这里我们想向你介绍其中的一些。首先，由于到达具体一点的电子数目并不像从命题A得出的结论那样，等于穿过孔1到达的数目与穿过孔2到达的数目之和，无疑我们会得到结论：命题A不成立。电子要么穿过孔1要么穿过孔2并不正确。但是这个结论可以用另一个实验来检验。

6-6 观察电子

现在我们来考虑下面的实验。在我们的电子实验仪器上加一个很强的光源，放在墙后两个孔之间，如图6-4所示。我们知道电荷会散射光。因此当有一个电子在飞向探测器的途中经过时，不论它是怎样经过的，它都会把一些光散射到我们的眼睛中来，从而我们可以看见电子在哪里飞过。例如，如果一个电子的路径像图6-4中画的那样是经过孔2的，那么我们就将看到来自图中标有A的地方附近的闪光。如果有一个电子穿过孔1，那么我们就会期望在上面的孔旁看到闪光。要是发生这样的事：我们同时在两个地方看到闪光，因为电子分成了两半……还是让我们做实验吧！

我们看到的情况是这样：每当我们听到（后障上）电子探测器的一次喀哒声，我们要么在孔1旁要么在孔2旁看到一个闪光，但是绝对不会同时在两处看到！不论我们把探测器放在什么地方，我们都观察到同样的结果。从这个观察结果我们得出的结论是，当我们观看电子时，我们发现电子总是要么穿过这个孔要么穿过那个孔。从实验看，命题A必定成立。

那么，我们否定命题A的论据有什么问题呢？为什么P_{12}不是正好等于P_1+P_2？还是回到实验上来！让我们追踪电子并观察它们在干什么。在探测器的每一个位置（x的一个值）我们对来到的电子计数，并依靠观察闪光记录下电子穿过哪个孔。我们可以这样记录：每当我们听到一次喀哒声，如果在孔1旁看到一个闪光，就在第一栏里记录一个计数；如果在孔2旁看到一个闪光，就在第二栏里记录一个计数。每个到达的电子都记录到这两类中：一类是穿过孔1的电子，另一类是穿过孔2的电子。从第一栏的数据我们得出一个电子经由孔1到达探测器的概率P_1'；从第二栏的数据我们得出一个电子经由孔2到达探测器的概率P_2'。如果我们对许多x值重复这一测量，就得到图6-4（b）中所示的P_1'和P_2'的曲线。

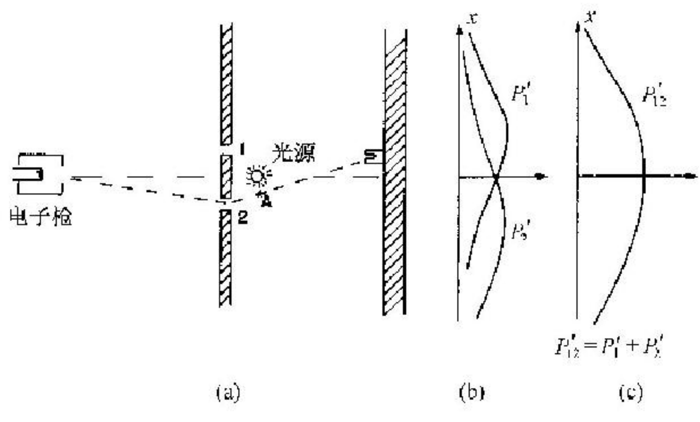


图6-4　另一个用电子做的实验

嗯，这些并不使人惊奇！我们得到的P_1'曲线和前面将孔2挡住所得出的P_1曲线非常相似；P_2'曲线和前面将孔1挡住所得出的P_2曲线非常相似。因此这里没有任何像穿过两个孔那样的复杂情况出现。当我们观看电子时，电子就像我们预期的那样穿过小孔。不论孔2是开还是关，我们观看到的穿过孔1的电子分布的方式相同。

但是先别忙！现在的总概率，即一个电子沿任意路径到达探测器的概率是什么呢？我们已经有了有关的数据。这只要假装我们根本没有看过闪光，而将原来分列两栏的探测器喀哒声归并到一起就行了。我们只须把原来的两栏数据相加。对一个电子穿过随便哪个孔到达后障的概率，我们得到的是$P_{12}'=P_1'+P_2'$。这就是说，虽然我们成功地观看到我们的电子是穿过哪个孔而来的，我们得到的却不再是原来的干涉曲线P_{12}，而是一条新的曲线P_{12}'，它不呈现任何干涉现象！只要我们把光源熄灭P_{12}就恢复。

我们必须得出结论，只要我们观看电子，它们在屏上的分布就同我们不看时的分布不同。也许是打开光源带来了干扰吧？想必是由于电子非常微小，而光在被电子散射开来的时候，给了电子一个反冲力，改变了电子的运动。我们知道，光的电场作用在一个电荷上时会对电荷施加一个作用力，因此也许我们应当预期运动会发生变化。无论如何，光对电子产生了巨大的影响。在试图“观看”电子时，我们就改变了它们的运动。这就是说，电子散射光子时所受到的反冲使电子的运动发生了足够大的变化，使得它本来也许是要到P_{12}为极大值的点上去的，现在却跑到P_{12}为极小值的点上去；这就是我们不再看到波状干涉效应的原因。

你可能会想：“别用这么亮的光源！把亮度降低！那么光波会变弱，对电子的干扰也不会这么厉害了。无疑，如果使光源越来越暗，最后光波会弱到这种程度，使得它的效应可以忽略。”好，让我们试试看。我们观察到的第一件事是，电子经过时散射造成的闪光并不减弱。它总是同样强度的闪光。光源变暗时发生的惟一事情是，有时我们听到探测器的一次喀哒声但是却根本看不到闪光。电子跑过去了而我们并没有看见它。我们观察到的是，光的行为也像电子；我们以前知道光是一个波，但是现在我们发现它也是颗粒状的。它永远以颗粒的形式（我们称之为“光子”）来到或被散射。当我们减弱光源的强度时，光子的大小并不改变，改变的只是光源单位时间发射光子数的多少。这就解释了，为什么在光源变暗时，有些电子经过而不被我们看见。在那些电子经过时，正好它们的周围没有光子。

这多少使人感到沮丧。如果真的只要我们看见电子我们看见的就是同样大小的闪光，那么我们看见的电子永远是受到干扰的电子。无论如何，让我们用一个暗光源做一下实验。现在，每当我们听到探测器的一次喀哒声我们就分三栏来记录：在第一栏里记录在孔1旁看见的电子，在第二栏里记录在孔2旁看见的电子，在第三栏里记录那些看不见的电

子。当我们整理出数据（计算概率）后我们发现以下的结果：那些“在孔1旁看见”的电子的分布像P_1'；那些“在孔2旁看见”的电子的分布像P_2'（因此“在孔1或孔2旁看见”的电子的分布像P_{12}'）；而那些“根本看不见”的电子的分布是波状的，正像图6-3中的P_{12}！如果电子没有被看见，就有干涉现象发生！

这是可以理解的。当我们没有看见电子时，没有光子干扰它，而当我们看见它时，一个光子已经干扰了它。对电子的干扰的大小永远相同，因为光子都产生同样大小的效应；而且光子被散射引起的效应足以抹掉任何干涉现象。

难道就没有什么办法可以让我们既看到电子而又不干扰它吗？我们在前面有一章里学过，一个“光子”携带的动量反比于光的波长（$p=h/\lambda$）。电子将光子散射到我们的眼睛中时所得到的反冲一定是依赖于光子所携带的动量的。有了！如果我们想要尽量少打扰电子，那么我们该做的不是降低光的强度，而是降低它的频率（这和增大它的波长相同）。让我们用颜色更红的光。我们甚至可以用红外光，或者无线电波（像雷达），并借助于一些能够“看见”这些波长更长的光的设备来“看”这些电子的去向。如果我们用较柔和的光，也许能够避免对电子干扰太厉害。

让我们用波长较长的波来做实验。我们将用波长越来越长的光，一次次重复我们的实验。起初，看不出有什么变化，结果是一样的。接着，可怕的事发生了。你还记得，在我们讨论显微镜时曾指出，由于光的波动本性，对两点靠近到什么程度仍然可以被分辨为两个分离的点存在着一个限制。这个极限距离与光的波长同一量级。于是，如果我们使光的波长比二孔之间的距离更长，当光被电子散射时我们就会看到一个巨大的模糊闪光。我们不再能分辨出电子是穿过哪一个孔了！我们只知道它在某个地方经过！正是对这种颜色的光，我们发现给予电子的反冲已经足够小，使得P_{12}'看起来开始像P_{12}了——我们开始得到一些干涉效应。只有用波长比两孔的间隔大得多的光（这时根本不可能分辨出电子经过哪里），由光引起的干扰才足够小，使我们能再度得到图6-3中的P_{12}曲线。

在实验中我们发现，不可能这样安排光源，使人们既可以分辨出电子是穿过哪个孔，而同时又不对概率分布图样产生任何干扰。海森伯提出，只有存在着某种前所未知的对我们的实验能力的基本限制，当时新发现的那些自然定律才能够相容一致。他提出了不确定原理作为一条普遍原理，这条原理用我们的实验可以表述如下：“不可能设计出一种仪器以确定电子穿过哪个孔，而同时又不使电子受到足以破坏其干涉图样的干扰。”如果一种仪器能够确定电子穿过哪个孔，它就不可能精致到使分布图样不受到实质的干扰。没有任何人找到过（或甚至想到过）一种绕过不确定原理的方法。因此我们必须假定它描述了自然界的一个基本特征。

我们今天用来描述原子、并且事实上描述一切物质的量子力学的全部理论取决于不确定原理的正确性。由于量子力学是这么成功的一个理论，这加强了我们对不确定原理的信任。但是，如果一旦发现了一种能够“打败”不确定原理的方法，量子力学就会给出矛盾的结果，因而不再是自然界的一个有效的理论，不得不抛弃它。

“那么”，你说，“命题A到底怎样呢？电子要么穿过孔1要么穿过孔2，这到底是对还是不对？”惟一可能的回答是，我们从实验发现，为了不陷入矛盾，我们必须按一种特殊的方式来思考。为了避免做出错误的预言，我必须说的是：如果你观看小孔，或更精确的说，如果你有一台能够确定电子是穿过哪个孔的仪器，那么你就可以说电子是要么穿过孔1要么穿过孔2。但是，当你并不试图分辨电子是走哪条路时，当实验中没有任何东西打扰电子时，那么你就不可以说一个电子要么是穿过孔1，要么是穿过孔2。如果你这么说了，并且开始由此做出种种推论，你就会在分析中犯错误。这是一条逻辑钢丝，如果我们想要成功地描写自然，就必须走这条钢丝。

***

如果一切物质——也包括电子——的运动都必须用波来描述，那么我们的第一个实验中的子弹又是怎么回事呢？为什么我们在那里看不到干涉图样？原来是因为，子弹的波长是如此之小，使得它的干涉图样变得非常之精细。它是精细得用任何有限尺寸的探测器都不能区分它隔开的极大值和极小值。我们看到的只是一种平均，那就是经典情况下的曲线。在图6-5中我们试图示意地表示大尺度物体发生的情况。图6-5（a）是用量子力学所预言的子弹的概率分布。

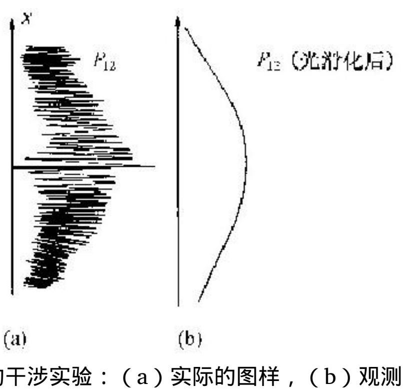


图6-5　子弹的干涉实验：（a）实际的图样，（b）观测到的图样

其中的快速起伏的条纹代表对波长极短的波所得出的干涉图样。但是，任何物理的探测器都要跨越概率曲线的几次起伏，所以测量给出的是图6-5（b）中画的光滑曲线。

6-7 量子力学的基本原理

我们现在要总结一下我们的实验的主要结论。但是，我们将把结果表述成对更普遍的实验也适用的形式。如果我们先定义一个“理想实验”，我们的总结就可以写得更简单。所谓理想实验，就是其中没有任何不确定的外来影响（没有我们考虑不到的振动或别的事情发生）的实验。说得更精确些，一个理想实验就是这个实验的全部初始状态和终了状态都完全确定。我们下面所称的“一个事件”，一般地说，指的就是一组具体的初始状态和终了状态。（例如：“一个电子离开电子枪，到达探测器，此外不发生任何其他事情。”）下面就是我们的总结。

总结

（1）一个理想实验中的一个事件的概率由一个叫做概率振幅的复数ψ的绝对值平方给出。

$P=$概率，

$\psi=$概率振幅，（6.6）

$P=|\psi|^2$。

（2）当一个事件可以以不同的方式发生时，这个事件的概率振幅是分别考虑的每种方式的概率振幅之和。这时有干涉现象。

$\psi=\psi_1+\psi 2$，

$P=|\psi_1+\psi_2|^2$。（6.7）

（3）如果做一个能够确定实际发生的是哪一种方式的实验，那么这个事件的概率是每种方式的概率之和。这时干涉现象消失。

$P_{12}=P_1+P_2$。（6.8）

你可能还要问：“这是怎么造成的？这条规律背后有什么机制？”还没有人找到过这一规律背后的任何机制。没有人能够比我们刚才“解释”的“解释”得更多。没有人会给予你关于这种情况的任何更深刻的表述。我们根本想象不出一个更基本的、可以推出这些结果的机制。

我们想要强调经典力学和量子力学之间的一个非常重要的差别。我们一直在谈论一个电子在给定的情况下抵达的概率。我们曾暗示，在我们的实验安排下（或哪怕是在尽可能好的实验安排下）不可能精确预言会发生的事情。我们只能预言事情发生的机会！如果这是真的，这将意

味着，物理学已经放弃了精确预言在确定的情况下会发生什么事情。是的，物理学已经放弃了这个！我们不知道如何预言在给定情况下会发生什么事情，并且现在我们相信这是不可能的，惟一可以预言的东西是不同事件的概率。必须承认，这是对我们早先的理解自然的理想的一种删约，也许是一步后退，但是还没有人看到绕开它的出路。

我们现在来对一个建议做一点评述，这个建议曾被提出以避免我们前面给出的描述。“也许电子具有某种我们迄今还不知道的内部机构——某些内部变量。也许这就是我们无法预言将会发生什么事情的原因。如果我们能够更仔细地观察电子，我们就有可能预言它的归宿。”就我们所知这是不可能的。我们将仍然处于困难中。假定在电子内部有某种机制决定它最后去到哪里。这个机制必定也决定它在途中是穿过哪一个孔。但是我们必须记住，电子内部的东西是应该不依赖于我们做什么事的，特别是不依赖于我们是打开还是关上某个孔。因此如果一个电子，在出发前已决定好（a）穿过哪个孔，以及（b）最后去到哪里，我们对那些选择孔1的电子求得的概率就应当是P_1，对那些选择孔2的电子求得的概率就应当是P_2，而穿过两个孔抵达的电子概率就必定是二者之和P_1+P_2，看来除此以外别无他法。而实验已经证实情况并非如此。还没有人想出一个办法来解决这个难题。因此在目前，我们只能限于计算概率。我们说“在目前”，但是我们强烈地感觉到，这很可能是某种将要永远伴随我们的东西，我们将不可能解决这个难题，自然界实际上就是这样。

6-8 不确定原理

海森伯原来是这样表述不确定原理的：如果你对任何物体进行测量，并且能够把它的动量的x分量确定到一个不确定量△p的精度，那么你同时对它的x位置就不能知道得比不确定量△x＝h/△p更精确。任何时刻的位置不确定量和动量不确定量的乘积都必须大于普朗克常量。这是我们前面以更普遍的方式叙述的不确定原理的一个特殊情形。更普遍的说法是，不能用任何方法设计出一种仪器设备，它能确定在两种情况中选用哪一种，而同时并不破坏干涉图样。

我们用一个特例来表明，为了不陷入麻烦，海森伯给出的这种关系必须成立。我们想象图6-3的实验的一种修正，其中带小孔的墙是安装在滚筒上的一块板，它能在x方向上自由运动，如图6-6所示。仔细观察板的运动，我们可以判断电子是穿越哪个孔。想象探测器位于x＝0处时所发生的情况。我们会预期，一个穿过孔1的电子必须被墙板向下偏转才能到达探测器。由于电子动量的垂直分量变了，墙板一定会反冲，反冲动量的大小相同，方向相反。墙板得到一个向上的反冲。如果电子穿过下面的孔，墙板会感到一个向下的反冲。很清楚，对于探测器的每一个位置，电子穿过孔1时与电子穿过孔2时墙板所接受的动量之值是不同的。因此，根本用不着打扰电子，只要观察墙板，我们就能判断电子走的是哪条路径。

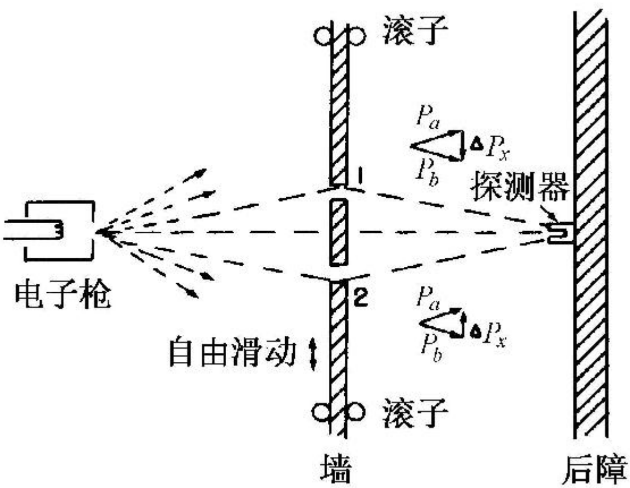


图6-6　测出墙的反冲的实验

而为了做到这一点，就必须知道在电子穿过孔之前墙板的动量。这样，当我们测量出电子穿越后墙板的动量，我们就能算出墙板的动量改变了多少。但是请记住，根据不确定原理，我们不能同时以任意高的精确度知道墙板的位置。可是如果我们不知道墙板的精确位置，我们就不能说出两个孔的精确位置。对于每个穿过小孔的电子，小孔将在不同的

地方。这意味着对于每个电子，我们的干涉图样的中心将在不同的位置上。于是干涉图样中的条纹将会被抹掉。我们将在下一章定量地表明，如果我们足够精确地确定墙板的动量，由反冲动量的测量来确定电子穿过的是哪一个孔，那么根据不确定原理，墙板的x位置的不确定量将足以使在探测器处观察到的图样在x方向上下移动一个相当于从极大值到附近的极小值的距离。这样一个随机漂移刚好将干涉图样抹掉，因此观察不到干涉现象。

不确定原理“保护”着量子力学。海森伯认识到，如果有可能以更高的精确度同时测量动量和位置的话，量子力学就会垮台。所以他提出这一定是不可能的。于是人们坐下来，试图找出能够这么做的办法，可是没有人能够找到一个办法，能以哪怕更高一点的精确度测量任何东西——一块墙板，一个电子，一个弹子球，任何东西——的位置和动量。量子力学以其充满风险但却精确的方式存在着。

理查德·费曼生平

理查德·费曼于1918年出生于布鲁克林[19]，1942年在普林斯顿获得博士学位。在第二次世界大战期间，尽管他年纪轻轻，就在洛斯阿拉莫斯的曼哈顿计划中起了重要的作用。战后，他在康奈尔大学和加州理工学院任教。由于他在量子电动力学方面的工作，于1965年与朝永振一郎和朱利安·施温格一起获得诺贝尔物理学奖。

费曼博士由于成功地解决了量子电动力学理论方面的问题而获得诺贝尔奖。他还创立了一个解释液氦中的超流现象的数学理论。此后，又与默里·盖尔曼一起在诸如β衰变等弱相互作用领域从事开创性的工作。在随后的岁月里，费曼提出了高能质子碰撞过程的部分子模型，在夸克理论的发展中起了关键的作用。

除了这些成就之外，费曼博士还在物理学中引入了基础性的新的计算方法和符号，特别是无处不在的费曼图，它——也许比近代科学史上任何其他的形式体系更多地——改变了人们对基本物理过程概念化和计算的方式。

费曼是一位卓有成效的教育家。在他所获得的众多的奖品中，他特别欣赏1972年获得的奥斯特教学勋章。1963年初版的费曼《物理学讲义》被《科学美国人》杂志的评论家誉为“难啃的但却营养丰富的美味佳肴。25年之后，它成为教师和大学新生中佼佼者的指南”。为了使广大非专业人士更多地了解物理学，费曼博士还写了《物理定律的特征》与《量子电动力学：光与物质的奇妙理论》。他还写过许多高深的论著，这些都成了研究者和学生的经典参考文献和教科书。

理查德·费曼是一位积极的公众人物。他在挑战者号事故调查委员会中的工作是街知巷闻的，尤其是他证明O形环对寒冷的敏感性的出色的演示，这个精彩的演示需要的只不过一杯冰水而已。比较鲜为人知的是费曼博士在20世纪60年代为加州的课程委员会劳心费神所做的事情，当时，他对教科书的平庸无奇提出了质疑。

列举理查德·费曼在科学和教育方面的无数成就并不能充分反映这个人物的本性。甚至他最专业的论著的读者也知道，费曼的活泼和多面的个性表现在他全部的工作中。他不仅是一位物理学家，在不同的时期，他还是收音机修理工、开锁匠、艺术家、舞蹈家、手鼓表演者、甚至还是玛雅象形文字的翻译家。他是一个模范的经验主义者，永远对身边的世界感到好奇。

理查德·费曼于1988年2月15日在洛杉矶去世。

[1]即唐努乌梁海，蒙古的西北角，现属于俄罗斯。——译者注

[2]吉本（Edward Gibbon），1737～1794，18世纪英国著名历史学家，《罗马帝国衰亡史》作者。

[3]金刚石是可以在空气中燃烧的。

[4]如果用结构式来表示，现在一般表示为O＝C＝O。--译者注

[5]指国际象棋。——译者注

[6]按照国际象棋的规则，卒子攻至底线后可成为任何棋，当然一般选择升级为后，因为后的威力最强，但也可升级为象。如果它攻至底线是发生在黑格，就成为黑格上的象。——译者注

[7]阿廖欣，1927～1935，1937～1946年国际象棋世界冠军。——译者注

[8]厄瓜多尔首都，在赤道上。——译者注

[9]费曼说的是当时即20世纪60年代初的情况。这样的理论现在已经有了，那就是盖尔曼提出的夸克模型、温伯格和萨拉姆提出的电弱统一理论和它们构成的粒子物理统一模型。——译者注

[10]克雷布斯（Krebs,H.A.），英籍德裔生物化学家。1937年发现三羧酸循环，对细胞代谢和分子生物学研究做出重要贡献，因此获1953年诺贝尔生理学和医学奖。——译者注

[11]我这个解说是多么急匆匆啊！在这个简短的解说中，每句话包含有非常丰富的内容。“所有的星星都是由同地球上一样的原子组成的”。我通常要就这样一个小题目讲整整一堂课。诗人们常常抱怨科学剥夺了星星的美丽——只剩下由气体原子构成的球体。根本不是这么回事。我也能在旷野的夜空中看到星星，并且有所感受。但是我比他们是看到更多呢，还是更少呢？无垠的天空拓宽了我的想象，盯着看这个回转的天穹，我小小的眼睛可以捕获100万年前发出的星光。一幅浩瀚的图样，我就是这幅图样的一部分，也许组成我身体的材料就是由某颗已被遗忘的星星喷发出来的，就像那边那颗星正在喷发一样。或者如果用帕洛玛天文台更大的眼睛（200厘米望远镜）来看它们，就可以看到它们从某个公共的起始点往四面八方急速散开，它们在以前某个时候也许都挤在那个起始点。这是多么浩瀚的一幅图样！它的意义何在？它的成因是什么？对这些问题有一点了解并无损于宇宙的神秘。因为真理比过去任何艺术家所想象的都更为奇妙！为什么现在的诗人不去颂赞它呢？如果朱庇特（Jupi-ter，罗马神话中的主神，又是木星的外文名）像一个人，就能够颂赞他，而如果它是一团巨大的由甲烷和氨气组成的自转的球体，就必须三缄其口，这算什么诗人？——原注

[12]氦的外文名称helium的原意是太阳素。——译者注

[13]我们在这里重视的并不是最后得到的结果（4.3）式，事实上，这个结果你们可能已经知道了，而是通过理论推理得出这个式子的可能性。

[14]反重子的重子数为-1。

[15]径矢是从太阳到行星轨道上任意一点的直线。

[16]这就是月球轨道圆上的点比1秒钟之前月球所在的点的切线往下掉了多少。

[17]本课程中将不给出这个证明。

[18]原文是1656年，经核实应为1676年。——译者注

[19]美国纽约市西南部的一个区。——译者注

SIX NOT-SO-EASY PIECES

费曼讲物理：相对论

Richard P. Feynman

【美】R·P·费曼 / 著　周国荣 / 译

R·P·费曼（1918－1988）出生在纽约市的法拉克维。1942年在普林斯顿大学获得博士学位。在第二次世界大战期间，他对发展原子弹做出过重要贡献。战后费曼曾先后在康奈尔大学和加州理工学院教书，1965年，他因量子电动力学方面的研究荣获诺贝尔物理学奖。除了作为一个物理学家外，费曼在不同时期还曾是轶事大王、艺术家、鼓手和密码破译专家。



走近费曼丛书
CS｜湖南科学技术出版社

版权信息

费曼讲物理：相对论

作者：(美) R·P·费曼

译者：周国荣

责任编辑：吴炜　陈刚

ISBN：9787535772411

湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
出版者的话
前言
特别序言（选自费曼《物理学讲义》）
费曼的序言（选自费曼《物理学讲义》）
第一章 矢量
1-1 物理学中的对称性
1-2 平移
1-3 旋转
1-4 矢量
1-5 矢量代数
1-6 用矢量法表示牛顿定律
1-7 矢量的标量积
第二章 物理定律的对称性
2-1 对称操作
2-2 时空对称
2-3 对称性与守恒定律
2-4 镜像反射
2-5 极矢量和轴矢量
2-6 到底哪一只是右手
2-7 宇称不守恒了
2-8 反物质
2-9 不完整的对称性
第三章 狭义相对论
3-1 相对性原理
3-2 洛伦兹变换
3-3 迈克尔孙-莫雷实验
3-4 时间的变换
3-5 洛伦兹收缩
3-6 同时性
3-7 四维矢量
3-8 相对论动力学
3-9 质量和能量的等效性
第四章 相对论性的能量和动量
4-1 相对论和哲学家
4-2 双生子悖论
4-3 速度的变换
4-4 相对论性质量
4-5 相对论性能量
第五章 空间和时间
5-1 空时几何学

5-2 空时间隔
5-3 过去、现在和未来
5-4 四维矢量的进一步讨论
5-5 四维矢量代数
第六章 弯曲空间
6-1 二维弯曲空间
6-2 三维空间的曲率
6-3 我们的空间是弯曲的
6-4 空时中的几何学
6-5 引力和等效原理
6-6 引力场中时钟的快慢
6-7 空时的曲率
6-8 在弯曲的空时中运动
6-9 爱因斯坦的引力理论

出版者的话

《费曼讲物理入门》（由Addison-Wesley出版公司于1995年出版）这本小册子那无与伦比的成功与畅销，激发起公众、学生甚至职业科研人员想要得到更多费曼的书面讲义和录音材料的强烈要求。因此，我们重新翻阅了原《物理学讲义》和加州理工学院的讲课记录，看一看是否还有更加“容易读的”篇章。结果没有找到。不过，倒是有许多不那么容易读的讲稿，这些讲稿尽管用到一些数学方法，但是，对于刚刚入门的理科学生来说，它们并不算太难；对于学生和非物理专业的人士来说，这六章讲稿与先前那六章同样令人兴奋、引人入胜和使人愉悦。

这些不那么容易读的篇章与先前那六篇之间的另一个差别是，先前那六个专题跨越了物理学中从力学到热力学以至到原子物理学的若干个领域。然而，大家手头上这六个新的问题却都围绕着一个主题，这个主题已经引发了从黑洞到虫洞，从原子能到时间反常等多项在现代物理学中最具革命性的发现和令人叹为观止的理论；我们所说的当然就是相对论了。不过，即使是相对论的创立者爱因斯坦大师本人，对这个理论所创造出来的奇迹、这个理论的作用以及它的基本概念，也无法做出像来自纽约的理查德·费曼这样的解释，这一点大家在阅读这些章节或者聆听CD录音时就会得到证明。

Addison-Wesley Lonsman出版公司衷心感谢罗杰·彭罗斯为这一辑演讲汇编所写的精辟的前言；感谢布赖恩·哈特菲尔德和大卫·皮内斯在挑选这六章讲义时提出的非常宝贵的建议；还要感谢加州理工学院物理系及档案研究所，特别要感谢朱迪思·古德斯坦在规划出版这本小册子及其CD录音中给予的协助。

前言

要了解理查德·费曼成为一代宗师的原因，就得对这位科学家的卓越成就做出正确的评价。理查德·费曼无疑是20世纪理论物理学界的杰出人物之一。他对这个领域的主要贡献是全面发展了将量子理论应用到当代前沿研究领域所使用的独特的方法，并且由此对这个领域的当代图景产生重大的影响。费曼路径积分、费曼图和费曼规则都属于现代理论物理学家所用的非常基本的工具之列，这些工具是将量子理论的规则应用到各个具体领域（如电子、质子和光子的量子理论）时所必需的，它们构成了使量子规则与爱因斯坦的狭义相对论的要求相一致的处理方法的基本要素。尽管这些概念没有一个是轻易就搞得懂的，但是，费曼的独特的处理方法总是使它们极其清晰明了，完全消除了以往的做法中不必要的复杂化。费曼在科学研究中独特的创新能力与他作为一名教师的特殊的才能有密切的联系。他有一种独一无二的天赋，使他能够避开那些常常令物理结果的本质难以理解的复杂性，透彻地理解深奥难懂的基本物理原理。

然而，在公众的观念中，费曼更为人们所熟知的是他的滑稽与诙谐、他的恶作剧、他对权势的藐视、他的手鼓表演、他与女性无论是挚深的还是肤浅的交往、他在脱衣舞夜总会的出没、晚年想要踏足地处中亚的偏僻国度图瓦的冒险尝试，以及许许多多其他的言行举止。毋庸置疑，理查德·费曼必定绝顶聪明，他那快如闪电的演算速度，他那包括开保险箱的技巧、与保安部门的巧妙周旋以及解读古玛雅经文在内的业绩——更不用说他最终获得的诺贝尔奖——都无疑证明了这一点。然而，作为20世纪造诣最深的和最具独创性的思想家之一，这些业绩没有任何一项完全表达出他在物理学家和其他科学家中所具有的不容争辩的地位。

著名的物理学家和作家、费曼提出其最重要的思想时的一位早期的合作者弗莱曼·戴逊，于1948年春当他还是康奈尔大学的研究生时，在给他在英国的父母的一封信中写道，“费曼是年轻的美国教授，天才与小丑对半，他那飞腾的活力使所有物理学家以及他们的孩子们笑口常开。然而，我最近发现，他所具有的品格远不止这些……”多年以后，他在1988年又这样写道：“一个真实的写照倒是该这样说，费曼既是天才又是小丑。深邃的思想和充满欢乐的逗趣并不是多重人格中相互孤立的要素……他思索与逗趣并举。”[1]的确是这样的，在他的演讲中，他的才智是自然流露的，而且常常是非比寻常的。在整个演讲中，他驾驭着听众的注意力，但决不会偏离演讲的目的，那就是对自然法则的原汁原味的、深刻理解的表述。通过笑声，他的听众得以放松而无拘无束，不会因为那些有点吓唬人的数学表达式和高深莫测的物理概念而感到沮丧。还有，虽然他乐于身处公众场所，而且无疑是一位杂耍演员，但这并不是他的表演的目的。他的目的是向公众传播关于基本物理概念，以及为

了恰如其分地表述这些概念所必需的基本数学工具的某些基本认识。

尽管笑声在他成功地驾驭听众的注意力方面至关重要，但是，对于这种基本认识的传播，更重要的是他的方法的直接性。的确如此，他有一种特别直接的，讲求实际的风格。他藐视那种几乎没有物理内容的不切实际的哲学思辩。甚至连他对数学的态度也有点相似。他几乎从不为了卖弄数学上的严谨性而使用数学，但是，对于他所需要的数学，他具有一种独特的技巧，并且能够以一种极其明晰的方式将其表述出来。他从不受人恩惠，也从来不轻易接受那些别人认为是正确的而未经自己独立判断的观点。因此，他的方法无论在他的研究工作中还是在他的教学过程中都是特别新颖的。于是，当费曼的方法与从前的方法明显不同时，遵循费曼的方法会更富有成效，这个想法将是一个相当有把握的赌注。

费曼最喜欢用来传达信息的方法是口头交谈。他不轻易也不常委身于印好的文字。在他的科学论文中当然会出现“费曼特性”了，不过读起来就有点像降了调的样子。费曼的才智正是在他的演讲中表露无遗的。他那家喻户晓的《物理学讲义》基本上是他的演讲记录的校订稿（由罗伯特·B·莱顿和马修·桑德斯负责），对于每一位拜读这份演讲稿的人，它那引人瞩目的特性是显而易见的。这里呈献给大家的小册子《费曼讲物理相对论》就是从那些记录中整理出来的。不过，即使在这里，单纯印出来的文字使某些东西明显地丢失了。我相信，要感受费曼的演讲中洋溢的全部活力，就必须亲耳聆听他的声音。这样，费曼方法的直接性、他对权势的傲慢，以及他的幽默就会成为我们能够即时分享的财产。幸运的是，所有这些演讲都被记录在这本书中，它给予我们这种机会——而我则强烈地建议，只要有机会，至少先听几段这些演讲的录音。一旦聆听了费曼用带有纽约这个现代化大都市的声调说出的有说服力的、迷人的和风趣的解说词，我们就不会忘记他是怎样演讲的，当我们阅读他的讲稿时，这些录音向我们提供一种理解其意义的图像。不过，无论我们是否真的去读这些讲稿，我们都能分享到某些明显令人激动的东西，当费曼对支配我们这个宇宙的各种运作方式的不同寻常的规律进行探索、探索、再探索时，他亲身感受到了这种激情。

这本六次演讲的小册子是经过精心挑选的，它的程度比早些时候由费曼的演讲汇集成的题为《费曼讲物理入门》（由Addison-Wesley Lonsman公司1995年出版）中的六个问题稍微高一点。此外，这些演讲相互配合得恰如其分，构成了现代理论物理学中一个最重要领域的完美而具有说服力的解说。

这个领域就是相对论，它在20世纪初首次闯入人类的意识中。爱因斯坦的名字显著地出现在这个领域的公众观念中。毫无疑问，是爱因斯坦于1905年首次清晰地阐明了相对论的深刻原理，为物理学为之努力的这个新领域奠定了基础。不过，在他之前，许多其他人，特别是H·A·洛伦兹和H·彭加勒，已经意识到（当时的）新物理学的大多数基本观念。此外，在爱因斯坦之前几个世纪，伟大的科学家伽利略和牛顿已经指

出，在他们创立的动力学理论中，一个匀速运动的观测者感知到的物理定律应该与一个静止观测者感知到的一模一样。到了后来，当J·C·麦克斯韦于1865年发表了支配电磁场以及光的传播的方程组之后，这种观点的关键问题才显露出来。结论似乎是：伽利略和牛顿的相对性原理不再适用；根据麦克斯韦方程组，光必定以确定的速度传播。因此，根据以下这个事实，即只有静止观测者才会看到光速在各个方向相同，就将一个静止的观测者与运动的观测者区分开。洛伦兹、彭加勒和爱因斯坦的相对性原理与伽利略和牛顿的不同，但它同样具有以下含义：一个匀速运动的观测者感知到的物理定律确实与一个静止观测者感知到的一模一样。

此外，在新的相对论中，麦克斯韦方程组与这个原理相容，而且，无论观测者可能朝哪个方向或者以怎样的速率运动，测量到的光速在各个方向上是一个确定的常数。如何实现这个魔法般的奇迹以调和那些明显令人绝望的相互矛盾的要求呢？我将把这个问题留给费曼，让他用自己独特的方式讲解。

相对论也许是物理学感受到对称性这个数学概念的力量的第一个领域。对称性是一个常见的概念，不过，怎样能够根据一套数学表达式使用这个概念，人们就不太熟悉了。但是，为了使一个方程组满足狭义相对论的原理，人们需要的正是这样一个概念。为了与相对性原理一致，必须存在一个对称变换，将一个观测者的观测量变换成其他观测者的相对应的量。相对性原理认为，对一个匀速运动的观测者来说，就如同对一个静止的观测者来说一样，物理现象“看起来是相同的”。之所以使用对称性这个概念，是因为物理定律在每一个观测者看来是相同的，而且，“对称性”最终断言，某些事物从两个截然不同的观点上看具有相同的行为。费曼用到具有这种特性的抽象问题上的方法是非常直截了当的，他能够以一种不具备任何特殊数学知识或者抽象思维天赋的人易于接受的方式表达这种概念。

尽管相对论揭示了从前不曾认识到的额外的对称性，但是，物理学中一些更现代的发展已经表明，某些先前被认为是普遍适用的对称性实际上莫名其妙地被破坏了。这个情况在1957年给物理学界带来了一次意义最为深远的冲击，正如李政道、杨振宁和吴健雄的工作展现的那样，在某些基本物理过程中，一个物理系统与其镜面反射所遵循的规律并不相同。事实上，费曼参与了能够容纳这种不对称性的物理理论的发展研究。因此，他在这本小册子中的解说将随着大自然的奥秘不断被揭示出来而生动地展开。

随着物理学的发展，用以表述新的物理定律的数学形式体系也要发展。当数学工具被巧妙地应用到相应的课题中时，它们就会使物理学看起来好像比不做这种应用时更简单。矢量运算的概念就是一个例子。三维矢量运算原先是为了处理普通空间的物理学问题而发展起来的，它向我们提供了一件用来表述物理定律的珍贵的工具，牛顿物理学定律就是这样的定律，这些定律在空间上没有哪一个方向更为优先。将这个特性

用另一种方式表述出来就是，物理定律在普通的空间旋转下具有对称性。费曼令矢量表示法恢复了巨大的威力，使表述这种定律的基本思想重放异彩。

然而，相对论告诉我们，在这种对称变换的作用范围内，时间也应该被引入，因此要用到四维矢量运算。这种运算也由费曼在这本小册子中给我们做了介绍，这本小册子还使我们认识到，不仅时间和空间必须被看做同一个四维体系的不同方面，在相对论的方案中，对能量和动量有同样的要求。

从物理上看，宇宙的历史应该被看做一个四维空时，而不是被看做一个随时间演化的三维空间，这个观点无疑是现代物理学的基本原理。这是一个其含义不容易被领会的观点。甚至连爱因斯坦在第一次听到这个观点时都没有认同它。实际上，空间时间的观点并不是爱因斯坦的观点，尽管如此，在公众的头脑中，这个观点常常被认为是爱因斯坦创造的。是德国籍的俄国几何学家H·明可夫斯基于1908年，即彭加勒和爱因斯坦系统地阐述了狭义相对论之后几年，第一次提出了四维空间时间的观点，明可夫斯基曾经是爱因斯坦在苏黎世理工学院求学时的一位老师。在一次著名的演讲中，明可夫斯基宣称："从今以后，孤立的空间，以及孤立的时间注定要退隐成为纯粹的阴影，只有两者之间的某种统一才会保留下来作为一个独立的实体。"[2]

我在上面提到的费曼最有影响力的科学发现来源于他从事量子力学研究时使用的空时方法。因此，空间时间对于费曼的工作以及对于现代物理学的普遍的重要性是无需多言的。正因为如此，费曼在推广他那强调其物理意义的空时概念时具有说服力就不会令人感到意外了。相对论不是凭空想象出来的哲学体系，空间时间也不仅仅是数学的形式体系。它是我们生活于其中的这个真实宇宙的基本要素。

当爱因斯坦对空间时间的概念变得习以为常之后，他就把这个概念完全接纳到自己思考问题的方式中。这个概念成了他那个狭义相对论（我在前面介绍过的由洛伦兹、彭加勒和爱因斯坦提出的相对论）的推广理论即广义相对论的基本要素。在爱因斯坦的广义相对论中，空间时间变成弯曲的，我们能够将引力现象结合到这种弯曲中去。显然，这是一个难以领会的观念，而在这一辑演讲汇编的最后一讲中，费曼并没有尝试叙述为了使爱因斯坦的理论得到完整而系统的表述所必需的详尽的数学工具。不过，为了使我们理解上述基本概念，他用具有深刻见解的引人入胜的类比做了极其生动的表述。

费曼在所有演讲中都极力保持其叙述的准确性，每当他的简化或者类比存在任何可能被误解或导致错误结论的危险时，他几乎总是要对自己所说的话附加条件。不过，我觉得他对爱因斯坦的广义相对论的场方程的简单化的说明需要一个他完全没有给出的条件。由于在爱因斯坦的理论中作为引力源的"有效"质量并不是简单地（根据爱因斯坦的$E=mc^2$）与能量等同；取而代之的是，这个源是能量密度加上压强的总

和，而正是这个源令引力造成向内加速的行为。有了这个附加的条件，费曼的解说就完美了，而且为物理学理论的这种最完美的和自恰的特性准备了一个极好的介绍。

虽然费曼的演讲当之无愧地针对那些无论是出于专业需要，还是仅凭兴趣而渴望成为物理学家的人，它们无疑也适合那些没有这个愿望的人。费曼坚信（我同意他的意见），根据已经认识到的现代物理学的基本原理去传播我们对宇宙的认识，比起仅仅从物理课所规定的教学内容中获得的知识，其重要性要广泛得多。甚至在晚年，当他参与“挑战者号”灾难事故的调查时，他也煞费苦心地在国家电视节目中证明，灾难的原因是某些在日常事件中就应该能够觉察到的东西，他还在电视摄像机前做了一个简单但令人信服的实验，用来说明航天飞机的O形环在寒冷条件下的脆弱特性。

他无疑是一位杂耍演员，有时候甚至是一个小丑；但是，他的首要目的总是严肃认真的。而又有什么事情的目的能够比在最深刻的层次上认识我们这个宇宙的特性更为严肃认真的呢？在传播这种认识方面，理查德·费曼的地位是至高无上的。

罗杰·彭罗斯

1996年12月

特别序言（选自费曼《物理学讲义》）

在他生命的暮年，理查德·费曼的声望已经超出了科学界的范围。作为调查“挑战者号”航天飞机灾难事故委员会的一员，他的功绩使他广为人知；同样，一本有关他那富于传奇色彩的生涯的畅销书使他成为人们心目中几乎与阿尔伯特·爱因斯坦并驾齐驱的著名人物。不过，哪怕退回到1961年，在他获得诺贝尔奖而在公众中声名大噪之前，费曼也并不仅仅在科学界闻名——他是一个传奇式的人物。他那非凡的教学才能无疑促使其传奇故事广为流传，并增添了神奇的色彩。

他不愧是一个伟大的教师，也许是他那个和我们这个时代最出色的。对于费曼来说，演讲大厅就是一个大剧场，演讲的人就是一个演员，既负责提供剧本，也要提供渲染演出效果的焰火以及要传达给听众的事实和数字。他会在讲坛上来回走动，挥动着双手，“理论物理学家与马戏团的杂耍演员两者难以做到的结合，在所有身体动作和声响效果上，”《纽约时报》这样写道。不论他演讲的听众是学生、同事还是公众，那些有幸亲眼目睹费曼演讲的人，对其讲演的感受都是非比寻常的，而且总是难以忘怀的，就像对费曼本人一样。

他是一个喜剧大师，善于吸引各种层面的听众的注意力。许多年前，他讲授过一门高等量子力学课程，这是为加州理工学院的一些在校研究生和该校物理系的大部分教师开设的一门大课。在其中一次讲课中，费曼开始说明如何用图解法表达某些复杂的积分：时间用这根轴表示，空间用那根轴表示，这条直线就用波状线表示，等等。在描述完物理学界熟知的费曼图之后，他转过身来面对着全班学生，诡秘地咧嘴笑道：“这就是那个图！”费曼的演讲结束了，演讲大厅爆发出一阵阵自发的喝彩和掌声。

在完成本书讲义之后许多年里，费曼偶尔担任了加州理工学院大学一年级学生的物理学课程的客座授课。由他出马自然要保密，使得演讲大厅中有座位留给那些登记选课的学生。在这样一次演讲中，主题是弯曲的时空，费曼表现得特别出色。不过，最令人难忘的时刻却是在演讲开始的时候。当时1987超新星刚刚被发现，费曼对此感到非常兴奋。他说：“第谷·布拉赫有他的超新星，开普勒也有。之后400年间就再也没有过了。可是现在，我也有我的超新星了。”教室里安静下来了，费曼继续说道：“在银河系中有1011颗星星。通常，这是一个巨大的数字。但是，这只不过是1000亿而已。它比我国的财政赤字还小呢！我们通常把这些数字叫做天文数字。可现在，我们应该把它们叫做经济学数字了。”全班情不自禁地大笑起来，而费曼，在抓住了听众之后，继续他的演讲。

除了表演才能之外，费曼的教学技巧并不复杂。我们在加州理工学

院档案库保存的文件里找到了说明他的教学理念的一段概括性的话，这是他1952年在巴西时为自己匆忙写下的一张便笺：

“首先要搞清楚你为什么要学生学这个专题，以及你要他们知道哪些东西，至于用什么方法就或多或少由常识给出了。”

费曼所谓的“常识”常常就是完全抓住问题本质的出色技巧。在一次对公众的讲演中，他要解释为什么不可以用提出观念的同一组数据来检验这种观念。似乎是偏离了演讲的主题，费曼开始讨论汽车牌照问题。“你们看，今晚发生了一件最令我吃惊的事情。当时，我正到这里来演讲，我穿过停车场进来了。你们不会相信发生了什么事情。我看到了一辆汽车，车牌是ARW357。你能想象吗？在全国几百万个车牌中，今晚我看到这个特殊车牌的机会有多大？真令人惊奇！”甚至许多科学家也未能掌握的问题，通过费曼那非比寻常的“常识”却弄明白了。

在加州理工学院的35年中（1952～1987），费曼创下了讲授过34门课程的纪录。其中25门课程是研究生的高级课程，只限于研究生修读，本科生要修读这些课程需要获得批准（他们常常修读这些课程，因为请求几乎总是获得批准）。其余的课程主要是研究生的入门课程。纯粹为本科生开设的课程，费曼只教过一次，这就是在1961～1962学年和1962～1963学年备受称道的那一次，在1964年又简略地重讲了一次，这次讲课的内容后来就编成了《物理学讲义》。

当时，加州理工学院中有一个共识，那就是大学一、二年级的学生常被头两年必修的物理学课程搞得情绪低落、毫无兴趣，而不是受到激励。为了纠正这种状况，学院要费曼给学生开设一系列覆盖两年时间的讲座，先给一年级的学生讲，接着再给升上二年级的同一班级的学生讲。在得到他同意后，学院很快就决定，将讲课的内容记录下来出版。结果发现，这项工作比人们想象的要困难得多。要将讲课的内容整理成可以出版的讲义，费曼的同事需要做大量的工作，而他本人也一样，要对每一章的内容做最后校订。

课前还得先讲一讲开设这门课程的基本想法和组成部分。由于费曼对要讲什么只有一个不明确的大纲，使这项工作变复杂了。这意味着，只有当费曼站在坐满学生的演讲大厅中讲课时，人们才知道他要讲些什么。然后，学院里协助他工作的教授就会急急忙忙地处理像编写课外作业之类的琐碎细节。

费曼为什么要花上两年多的时间改革初等物理学的教学方法呢？人们只能推测其中的原因，不过，基本的原因大概有三个。第一个是他喜欢有一大群听众，这给了他一个比研究生课程中所拥有的更大的剧场；第二个是他真诚地关爱学生，他朴素地认为，教大学一年级的学生是一件重要的事情；第三个而且可能是最重要的原因是，按照他自己的理解来重整物理学，使得能够把它传授给年轻的学生，这是一项极富挑战性的工作。这是他的特性，是他衡量某件事情是否真正理解了的标准。有

一次，学院的一位老师请费曼解释自旋等于1/2的粒子为什么服从费米狄拉克统计。他完美地给这位听众解释了一番，并说道，“我将就这个问题为大学一年级学生开一次讲座。”可是过了几天他回来说，“不行，我干不了这件事。我没法把它简化到大学一年级的水平。这意味着实际上我们并不理解它。”

将艰深的概念化解为简单的、可以理解的词句，这种特色在整部《物理学讲义》中都很明显，但是，表现得最突出的是他对量子力学的讨论。对于那些费曼迷来说，他所做的事情是清楚的。他向刚入门的学生介绍了路径积分方法，这是他发明的用来解决某些最深奥的物理问题的方法。他用路径积分所做的工作，以及其他成就，使他与朱利安·施温格和朝永振一郎一起分享了1965年度的诺贝尔奖。

掀开久远的记忆的面纱，许多参加过讲座的学生和教师都说，与费曼共度物理学课程的两年时光是人生难得的一次经历。不过，当时的情况似乎并不是这样。许多学生害怕进入教室，随着课程的进展，来上课的注册选课的学生人数开始急剧地下降。可是同时，越来越多的教师和研究生开始来听课了。教室一直挤得满满的，费曼也许从来就不知道他正在失去一部分他特意要争取的听众。不过，即使在费曼看来，他在教学方法上的创新尝试也并不成功。1963年他在《物理学讲义》的序言中写道：“我不认为我对学生做得很好。”重读这些讲义，人们有时似乎感到费曼正注视着他的同事而不是他的年轻学生，说道，“看哪！看一看我是如何略施小计解决这个问题的！难道这不是很巧妙吗？”可是，即使他认为他是在给大学一二年级学生做出浅显易懂的解释，真正能够从他做的事情中获得最大收益的却并不是他们。这个巨大成就的主要受益者是他的同行们——科学家、物理学家和教授，透过理查德·费曼那新颖的和富有活力的观点审视物理学。

费曼不仅是一位伟大的教师。他的才华在于他是教师们的一个出色的老师。如果编写《物理学讲义》的目的只是为挤满一堂的大学本科生解决物理学课程的考试问题，那么，他并不特别成功。而且，如果原来的意图是把这些讲义用做大学的入门教科书，也不能说他实现了目标。尽管如此，这套讲义已经被翻译成10种语言，并且有4种双语版本。费曼本人认为，他对物理学最重要的贡献不是量子电动力学，不是液氦的超流理论，不是极化子模型，也不是部分子模型。他的主要贡献是这3本《物理学讲义》。这个看法表明，出版这几本备受称道的讲义的这个纪念版是完全有道理的。

大卫·L·古德斯坦

格里·纽吉堡尔

1989年4月于加州理工学院

费曼的序言（选自费曼《物理学讲义》）

这是我去年与前年在加州理工学院给大学一二年级学生讲授物理学时的讲义。这本讲义当然不是逐字逐句的讲课记录稿——它们或多或少都经过编辑加工。讲课只是构成整个课程的一部分。全班180个学生每周两次聚集在一个大教室中听课，然后分成15～20个学生一组的复习讨论小组由助教进行辅导。此外，每周还有一次实验课。

在这些课程中，我们想要解决的主要问题是，使那些充满热情而且相当聪明的中学毕业后进入加州理工学院的学生仍然保持他们的兴趣。他们早就听许多人说过物理学如何有趣、如何引人入胜了——相对论、量子力学和其他近代概念。但是，当他们学完两年我们以前的那种课程后，许多人就泄气了，因为教给他们的实际上很少有意义重大的、新颖的和现代的观念。要他们学的还是斜面、静电及诸如此类的内容，两年过去了，不免令人相当失望。问题是，我们是否能开设一门课程来顾全那些更优秀、更勤奋的学生，使他们保持求知的热情。

这份讲义完全不是概论性的，而是一门极其严肃认真的课程。我设想这些课程是对班级中最聪明的学生讲的，而且只要有可能，就要确保甚至最聪明的学生也不能完全消化讲课中的所有内容（通过在讲课中提出一些有关的观念和概念在主要线索之外各个方向上的应用）。为此，我试图使所有的陈述尽可能准确，在每种场合都指出有关的公式和概念在整个物理学中占有什么样的地位，以及（随着学习的深入）应该怎样做出修正。我还感到，对于这样的学生，重要的是向他们指出，哪些东西是他们通过对已学过的知识进行演绎就应该能够理解的（如果他们足够聪明的话），哪些东西是作为新东西而引入的。每当新概念出现时，如果这些概念是可以推演出来的，我就尽量把它们推演出来，否则就说明这是一个新概念，它不以任何他们学过的知识为基础，而且认为它是不能证明的——它只是新引进来的。

在课程开始时，我假定学生们在中学毕业时已经知道了某些内容——比如说几何光学、简单的化学概念等。我也看不出有任何理由要按某个确定的顺序来讲授这门课，这个顺序意味着在做好准备详细讨论某个概念之前，我不能提到这个概念。我在讲课中曾经提到过许多将会详细讨论的内容，而提到时并未进行充分的讨论。这些问题的更完整的讨论要等到以后当学生的预备知识更充足时再进行。对电感和能级的讨论就是两个例子，最初只是以非常定性的方式引入这些概念，后来才更全面地展开讨论。

在对准那些更主动的学生的同时，我也希望照顾到另一些学生，对他们来说，这些额外的五花八门的内容和附带的应用只会使他们感到烦恼，也根本不指望他们能听懂讲课中的大部分内容。对这些学生，我希

望至少有一个他能够掌握的中心内容或主干材料。即使他并不理解一堂课中的所有内容，我希望他也不要紧张不安。我并不要求他理解所有的内容，只要求他理解核心的和最直接的部分。当然，他也得有一定的水平来领会哪些是主要的定理和概念，哪些是更复杂的枝节问题和实际应用，只有在以后才会理解。

在讲课的过程中遇到了一个严重的困难：没有任何来自学生的反馈信息向我说明讲课的效果究竟如何。这的确是一个很严重的困难，我不知道讲课的效果实际怎样。整件事情实质上是一次实验。如果我真的再讲一次的话，我将不会按同样的方式去讲了——我希望我不必再讲一次！不过我认为，在第一年中这些课程——就物理内容来说——还是相当令人满意的。

在第二年里，我就不那么满意了。课程的第一部分讨论电磁学，我想不出任何真正独特或不同寻常的处理方法——比通常的讲述方式更为引人入胜的任何处理方法，因此，我不认为我在讲授电磁学时做了很多事情。在第二年末，我本来打算继电磁学之后再讲一些物性方面的内容，主要讨论基本模式、扩散方程的解、振动系统、正交函数等问题……逐步阐述通常称为“数学物理方法”的初步内容。现在回想，如果再讲一遍的话，我会回到原来的这个想法上去的。但是，由于没有计划要我再讲一遍这门课，有人就建议，试着介绍一下量子力学可能是个好主意——这就是大家将在第三卷中看到的内容。

很清楚，主修物理学的学生可以等到第三年再学习量子力学。另一方面，有一种说法认为许多修我们这门课的学生只是把学习物理学作为他们在其他领域中的主要兴趣的背景知识。而通常处理量子力学的方法使大多数学生几乎无法利用这门学科，因为他们必须花相当长的时间去学它。然而，在量子力学的实际应用中——特别是在较复杂的应用，如电机工程和化学领域中——整个微分方程的处理方法实际上并没有被用到。因此，我试着这样来叙述量子力学的原理，即不要求学生首先熟悉偏微分方程这个数学工具。我想，即使对一个物理学家，由于在讲义本身中可以明显看出的一些原因，按照这种颠倒的方式来介绍量子力学也是一件值得一试的有趣的事。然而，我认为，在量子力学方面的尝试并不完全成功——这主要是因为在最后我实际上已经没有足够的时间了（比如说，我应该再多讲三四次课，以便更完整地讨论诸如能带、概率幅的空间依赖关系等问题）。还有，我过去从未以这种方式讲授过这个专题，因此，反馈信息的缺乏就尤其严重。我现在相信，还是应当迟一些再讲授量子力学。也许有一天我会有机会再来讲授这个专题。那时我会讲好这门课程。

没有编写如何解题的章节是因为另有答疑辅导课。虽然我在第一年中的确讲过三次怎样解题的内容，但并没有把它们编在这本讲义中。在转动系统这部分内容后面肯定还讲过一次惯性导航的问题，可惜它被遗漏了。第五讲和第六讲实际上是由马修·桑德斯讲授的，当时我不在城里。

当然，问题是这次试验的效果究竟如何，我个人的看法——然而，与学生一起学习的大部分教师似乎并不同意这种看法——是悲观的。我并不认为我对学生做得很好。当我看到大多数学生在考试中处理问题的方法时，我认为整个这次试验是一次失败。当然，朋友们提醒我，也有那么一二十个学生——非常出人意料地——理解了全部课程中的几乎所有内容，他们还非常积极地阅读有关的材料，兴致勃勃地思考各种问题。我相信，这些学生现在已经具备了第一流的物理学背景知识——他们毕竟是我想要培养的那种学生。不过，正如吉本[3]所说，“教育的威力是难得见成效的，除非教者与被教者双方是理想的组合，然而这时教育又几乎是多余的了。”

尽管如此，我并不希望让任何一个学生完全落在后面，虽然也许曾经发生过这样的事。我认为，我们能够更好地帮助学生的一个办法就是，多花一些精力去编写一套能够说明讲课中某些概念的习题集。习题提供了一个充实讲课内容的良好机会，使已经讲过的概念更实际、更完整而且记得更牢。

然而，我认为，除非我们认识到，只有当一个学生和一个优秀的教师之间建立起个人的直接联系的情况下——这时学生可以讨论概念、思考问题和讨论问题——才能达到最好的教学效果，否则没有任何办法解决教育中的这个问题。只是坐着听课，做指定的习题，是不可能学到很多东西的。不过，在现在这个时代，我们有这么多学生要教育，因此，我们不得不试着寻找某种代替理想情况的方法。也许我的讲义能够做出一些贡献。也许在某些小地方有个别的教师和学生会从讲义中得到一些启示或者想法。也许他们乐于透彻地思考讲义的内容——或者进一步发展其中的一些想法。

理查德·P·费曼

1963年6月



第一章　矢量

1-1　物理学中的对称性

在这一章中，我们将介绍一个问题，这个问题在物理学的术语中叫做物理定律的对称性。在这里，“对称性”这个词是在一种特别的含义下被使用的，因此需要对它做出界定。一件事物什么时候是对称的——我们该如何定义它呢？当我们拿起一幅对称的图画时，它的一边总是与另一边相同。赫尔曼·外尔教授曾经给对称性下过这样的定义：如果能够让一件事物经历某个操作，而且它在经历了这个操作之后看上去没有任何变化，就说这件事物是对称的。比如说，如果我们观赏一个左右对称的花瓶，那么，让它绕垂直轴转过180°，它看上去就与原来一模一样。关于对称性，我们将采用外尔这种较为普遍的定义，我们将用这种定义讨论物理定律的对称性。

设想我们在某个地方建造一台机器，它由许多不同的部件组成，各个部件之间有大量错综复杂的相互作用，还有相互之间有作用力的活蹦乱跳的小球，如此等等。接下来设想我们在另外某个地方建造完全同类型的装置，每个部件都与原来的一模一样，相同的尺寸和取向，除了水平地移动了一段距离外，一切相同。然后，如果我们在严格一致的相同的初始状态下开动两台机器，我们要问：某台机器与另外一台机器会完全一样地运转吗？它们会严格对应地实现所有动作吗？有充分的理由认为答案是否定的，原因是，如果我们建造机器的地点选择不当，它就会有可能被安装在某个围墙中，来自围墙的干扰就有可能使机器的运转失灵。

物理学中所有的观念都需要我们懂得应用它们的常识；它们并不是纯粹的数学观念或者抽象概念。当我们说将机器移到新的地点后现象相同这句话时，必须明白自己在说什么。这句话表示移动各种我们认为是相互关联的物体；假如现象不一样，就认为某些相关的东西没有被移过去，那就得再把它找出来。假如我们一直都找不到这种东西，那就得断言物理定律不具有这种对称性。另一方面，假如物理定律确实具有这种对称性，我们就可以找到它（我们预料能找到它）；环顾四周，我们就会发现，比如说，围墙正在影响着我们的机器。根本的问题在于，假如我们把事物确定得足够明确，假如所有必不可少的力都包括在机器中，假如所有相关的部件都从一个地点移到另一个地点，那么，这些规律是否会一样呢？机器是否会以相同的方式运转呢？

显然，我们想要做的事情是移动所有的设备和基本影响，但并不是世界上所有的物体——行星、恒星等，因为如果我们这样做了，我们就会由于显而易见的理由重现相同的现象，这个理由就是，我们正好回到开始时的状态。不，我们不能移动所有的物体。不过，实践表明，只要

我们对所要移动的事物有一定的了解，机器就会运转。换句话说，假如我们不把机器安装在围墙里面，假如我们知道外力的起因，并设法把这些力也移走，那么，这部机器在某个地点就会像在另一个地点一样以相同的方式运转。

1-2　平移

我们将把分析局限在力学范围，关于这个领域我们现在有足够的知识。在前面的章节中我们已经看到，对于每一个粒子，力学定律能够用三个方程构成的方程组来概括：

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=F_x,\quad m\frac{d^2y}{dt^2}=F_y,\quad m\frac{d^2z}{dt^2}=F_z \qquad (1.1)$$

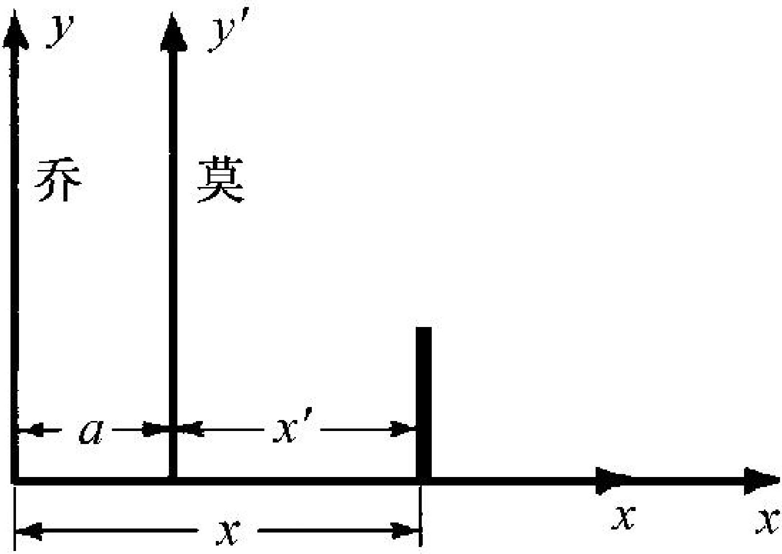


图1-1　两个相互平行的坐标系

这就意味着有办法在三个相互垂直的轴上测量x,y和z，以及沿着这些方向的力，以便使上述定律成立。这些测量必须从某个原点开始，可是我们把原点放在哪里呢？当初，牛顿理论所能告诉我们的是，存在某个位置，我们能够从这个位置开始测量，以确保这些定律是正确的，这个位置也许就是宇宙的中心。但是，能够立刻证明，我们永远找不到这个中心，因为如果我们使用别的某个原点，所得到的结果没有任何差别。换句话说，设想有两个人，一个是乔，他在某个位置有一个原点，另一个是莫，他有一个平行的坐标系，但原点在别的位置（图1-1）。当乔测量空间某点的位置时，他发现这个点在x,y和z处（我们通常会把z轴省略，因为在图中把它画出来就太乱了）。另一方面，当莫测量同一个

点时，他会得到一个不同的x（为了区分它，我们将把它叫做x'），而且原则上也得到一个不同的y，尽管在这个例子中它们数值相同。因此有

$$x'=x-a,\quad y'=y,\quad z'=z \tag{1.2}$$

为了完成我们的分析，必须知道莫测量力时会得到什么。力被设想成沿着某条线作用，而x方向的力则表示整个力在x方向的那个部分，是力的大小乘以它和x轴的夹角的余弦。现在我们看到，莫使用的投影与乔使用的投影完全相同，于是我们得到以下一组方程

$$F_{x'}=F_x,\quad F_{y'}=F_y,\quad F_{z'}=F_z \tag{1.3}$$

这些就是由乔和莫所测得的量之间的关系。

问题在于，如果乔认识牛顿定律，而莫也试图写出牛顿定律，那么，这些定律对他来说还正确吗？从他的原点开始测量，位置会有任何差别吗？换句话说，假定方程组（1.1）是正确的，而方程组（1.2）和（1.3）给出测量结果之间的关系，以下方程对还是不对呢？

$$\begin{aligned}&(\text{a})\quad m\frac{\mathrm{d}^2x'}{\mathrm{d}t^2}=F_{x'},\\&(\text{b})\quad m\frac{\mathrm{d}^2y'}{\mathrm{d}t^2}=F_{y'},\\&(\text{c})\quad m\frac{\mathrm{d}^2z'}{\mathrm{d}t^2}=F_{z'},\end{aligned} \tag{1.4}$$

为了检验这些方程，我们将对公式中的x'求导两次。第一次求导给出

$$\frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(x-a)=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}-\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}.$$

在这里，我们将假定莫的原点相对于乔的原点是固定的（不动的）；这样，a是一个常数，而da/di＝0，于是得到

$$\frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},$$

由此可以得到

$$\frac{d^2x'}{dt^2}=\frac{d^2x}{dt^2};$$

因此，我们确信方程（1.4a）变成

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=F_{x'}.$$

（我们还假定，由乔和莫测得的质量相等。）这样，加速度乘以质量的结果与另一位同伴的结果相同。我们还得到了关于$F_{x'}$的公式，将结果代入方程（1.1）中，我们就得到

$$F_{x'}=F_x.$$

因此，由莫看到的规律看来是相同的；他用不同的坐标系也可以写出牛顿定律，这些定律仍然是正确的。这就意味着，没有惟一的方法定义世界的原点，原因就是无论从哪个位置观测，这些定律看起来都将是相同的。

以下的说法也是正确的：如果在某个地点有一件带有某种机械装置的设备，在另一个地点上相同的设备将以相同的方式运转。为什么会这样呢？因为一部由莫研究的机器与另一部由乔研究的机器满足完全相同的方程。既然方程是相同的，那么，现象看起来就是相同的。于是，证明一部机器在新位置的行为与在老位置的行为相同，或者证明在空间中移动时方程的形式不变，两者是一回事。由于这个原因，我们说物理定律对于平移变换是对称的，这个说法表示，当我们进行坐标平移时物理定律并不改变。当然，从直观上看，这个说法显然是正确的，但是，讨论其数学表述是引人入胜和令人愉快的。

1-3　旋转

以上是一系列比较复杂的命题中的第一个命题，这些命题与物理定律的对称性有关。下一个命题说，无论我们将坐标轴指向何方都不会引起差异。换句话说，假如我们在某个地方建造了一台设备，并观察它运转，又在附近建造一台同类型的设备，但是摆放的方位转过一个角度，它会以相同的方式运转吗？显然不会，比如一个有摆的落地大座钟就是例子！如果把一个摆钟竖直放置，它就会走得很好，但是如果把它斜着放置，摆锤就会碰到钟罩的壁，钟就停下来了。于是，对于一个摆钟，上面的法则就不灵了，除非我们把吸引着钟摆的地球也算进去。因此，假如我们相信，对旋转来说物理定律是对称的，就能够对摆钟做出如下

预言：除了摆钟的机械部件之外，在它的运转中还包含着一些别的因素，一些我们应该去寻找的外在的因素。我们还可以预言，相对于这个神秘的不对称之源（也许就是地球），当摆钟被放置在不同的地点时，它将不会以相同的方式运转。确实如此，比如说，我们知道，一个放在人造卫星上的摆钟根本就不走，原因就是没有对它起作用的力，而在火星上，摆钟将以不同的速率运转。除了单纯的机械部件之外，摆钟里边确实包含某些别的东西，一些外在的东西。一旦认识到这个因素，我们就会明白，必须让地球随同机件一起转动。当然，我们无须为此担心，这是很容易做到的；只要等上那么一会儿，地球就会转过去；于是，摆钟在新的位置上就会像先前那样重新运转起来。当我们在空间中旋转时，转角必定是在不断变化的；这种变化似乎并没有给我们带来太多的麻烦，因为，在新的位置上，我们似乎处于与老地方相同的条件下。这很可能会令人迷惑不解，原因在于，物理定律在转动后的新位置上与在未经转动的位置上确实是相同的，但是，当我们转动一个物体时，说它遵从的定律与不去转动这个物体时它遵从的定律相同，这就不对了。假如我们做足够精密的实验，就能够断定，地球正在转动，但却不能说出它转过多少。换句话说，我们不能确定它的方位，但是能够断定它的方位在改变。

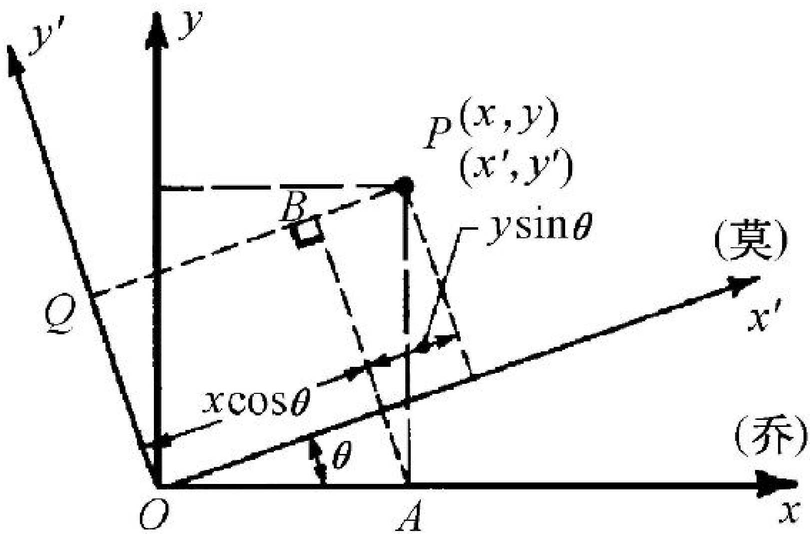


图1-2　具有不同角取向的两个坐标系

现在，我们可以来讨论角取向对物理定律的影响。让我们再来看一看，乔和莫两人玩的把戏是否能够重演。这一次，为了避免不必要的麻烦，我们将假定乔和莫采用同一个原点（我们已经证明过，坐标轴可以通过平移被移至别的地方）。假设莫的轴相对于乔的轴转过了一个角度θ。这两个坐标系如图1-2所示，只限于两维的情况。考虑任意一点P，在乔的坐标系中，它的坐标是（x,y），而在莫的坐标系中，它的坐标是（x'，y'）。和前面的例子一样，我们将这样开始：用x,y和θ来表示坐标x'和y'。为了这样做，我们先从P点向四根坐标轴各画一条垂线，并画出

垂直于PQ的线AB。看一看这张图就可以看出，x'可以写成沿着x'轴的两段长度之和，而y'则可以写成沿着AB线上的两段长度之差。所有这些长度都用x,y和θ表示出来，如方程（1.5）所示，其中已经加上了一个第三维的方程。

$$
\begin{aligned}
x' &= x\cos\theta + y\sin\theta, \\
y' &= y\cos\theta - x\sin\theta, \qquad (1.5) \\
z' &= z.
\end{aligned}
$$

下一步是，使用与前述相同的一般方法分析两个观测者所看到的那些力之间的关系。假设有一个力，（在乔看来）具有分量F_x和F_y，它正作用在一个质量为m，位于图1-2中P点的粒子上。为了简单起见，我们将两套坐标轴的原点移到P点，如图1-3所示。莫看到F沿着他的坐标轴的分量是$F_{x'}$和$F_{y'}$。F_x具有沿着x'轴和y'轴的分量，而F_y也同样具有沿着这两根轴的分量。为了用F_x和F_y表示$F_{x'}$，我们把它们沿着x'轴的这些分量加起来，利用同样的方法我们能够用F_x和F_y表示$F_{y'}$。所得到的结果是

$$
\begin{aligned}
F_{x'} &= F_x\cos\theta + F_y\sin\theta, \\
F_{y'} &= F_y\cos\theta - F_x\sin\theta, \qquad (1.6) \\
F_{z'} &= F_z.
\end{aligned}
$$

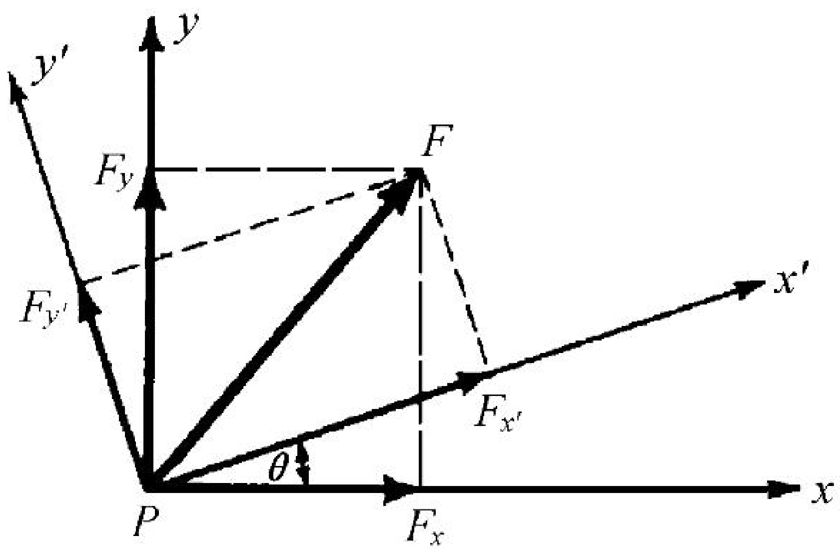


图1-3　一个力在两个坐标系中的分量

有趣的是看到一个出人意料的，然而却极其重要的情况：分别表示P的坐标和F的分量的公式（1.5）和（1.6）具有相同的形式。

和前面一样，假设牛顿定律在乔的坐标系中成立，并由方程（1.1）

表示。问题仍然是，莫是否能够应用牛顿定律——对于他那个坐标轴已被转动过的坐标系，所得到的结果还对吗？换句话说，如果我们假定方程（1.5）和（1.6）给出测量结果之间的关系，以下方程

$$
\begin{aligned}
m\frac{\mathrm{d}^2x'}{\mathrm{d}t^2}&=F_{x}{}',\\
m\frac{\mathrm{d}^2y'}{\mathrm{d}t^2}&=F_{y}{}',\\
m\frac{\mathrm{d}^2z'}{\mathrm{d}t^2}&=F_{z}{}',
\end{aligned}
\tag{1.7}
$$

对还是不对呢？为了检验这些方程，我们分别推算方程的左边和右边，并将推算的结果进行比较。为了推算方程的左边，用m乘方程（1.5），并对时间求两次导数，在推算中假定角度θ是常数。这个运算给出

$$
\begin{aligned}
m\frac{\mathrm{d}^2x'}{\mathrm{d}t^2}&=m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}\cos\theta+m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}\sin\theta,\\
m\frac{\mathrm{d}^2y'}{\mathrm{d}t^2}&=m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}\cos\theta-m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}\sin\theta,\\
m\frac{\mathrm{d}^2z'}{\mathrm{d}t^2}&=m\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}.
\end{aligned}
\tag{1.8}
$$

将方程（1.1）代入方程（1.6）就可以推算方程（1.7）的右边。这个运算给出

$$
\begin{aligned}
F_{x'}&=m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}\cos\theta+m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}\sin\theta,\\
F_{y'}&=m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}\cos\theta-m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}\sin\theta,\\
F_{z'}&=m\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}.
\end{aligned}
\tag{1.9}
$$

看到了吧！方程（1.8）和（1.9）的右边相等，我们因此推断，假如牛顿定律在一个坐标系中是对的，那么，它们在任何别的坐标系中也是对的。到目前为止，这个结果已经在坐标轴的平移和旋转操作下得以确立，由此得出一些推论：首先，没有人能够宣称他自己的坐标系是独

一无二的，不过当然啦，它们对解决某些特定的问题会更加方便。比如说，把引力的方向选做某根轴的方向是方便的，但在物理上这并不是必须的。其次，这个结果意味着，任何一套设备，如果它是完整的，即所有产生力的装置全部安装在里面，那么，当转过一个角度时，它的运转方式不变。

1-4　矢量

不仅牛顿定律，到目前为止我们所认识的其他物理定律，都具有这两种对称性，即在坐标轴的平移和旋转操作下的不变性。由于这些性质如此重要，因此已经发展了一种数学方法，用来书写和使用物理定律。

前面的分析含有很多乏味的数学运算。为了在这种问题的分析中把这些琐碎的细节减到最小程度，人们发明了一种强有力的数学工具。这种方法叫做矢量分析，它确定了本章的标题；不过，严格地说，这一章讲的是物理定律的对称性。利用前述的分析方法，我们就能够进行任何必要的分析工作，以获得所要寻找的结果，不过在实际上，我们总是喜欢把事情做得更轻松更迅速，因此我们使用矢量方法。

我们先来看一看在物理学中两种重要的量的某些性质（实际上不止两种，不过还是让我们从两种着手吧）。其中一种量，例如布袋中的马铃薯的数目，叫做普通的量，或者叫做无指向的量，也叫做标量。温度就是这种量的一个例子。在物理学中，其他重要的量是有指向的，比如说速度：我们不仅要知道一个物体的速率，还必须记录它向哪个方向运动。动量和力也是有指向的，位移也一样：当一个人在空间中从一个地点走向另一个地点时，我们可以记录他走了多远，但是如果我们还希望知道他到哪里去，就必须明确他走的方向。

所有像在空间中走的一步那样有指向的量，叫做矢量。

一个矢量就是三个数。为了表示在空间中所走的一步，比如说从原点到某个坐标是（x,y，z）的特定的点P，我们确实需要三个数，不过，我们打算造一个单个的数学符号r，这个符号与我们曾经用过的任何别的数学符号不一样。[4]它不是一个单个的数，而是表示三个数：x,y和z。它意味着三个数，但实际上又不仅是那三个数，因为，如果我们采用另一个不同的坐标系，这三个数就要变成x'，y'和z'了。不过，我们希望保持在数学上是简单的，因此，将用相同的记号表示（x,y，z）这三个数和（x'，y'，z'）这三个数。那就是说，在某个坐标系中，我们用一个记号来表示第一个数组的三个数，而在别的坐标系中，我们还是用这同一个记号来表示第二个数组的三个数。这种表示方法有这样的好处，即当我们改变坐标系时，它使我们无需改变方程中的字母。如果我们用x，y，z写下一个方程，又使用另一个坐标系，就不得不把坐标改成x'，y'，z'，但是，利用以下约定，只要写成r就行了，这个约定是：如果我们采用某一坐标系，它就表示（x，y，z），如果我们采用另一坐标系，它

就表示（x'，y'，z'），如此等等。在一个特定的坐标系中，描写物理量的三个数叫做矢量在这个坐标系中沿坐标轴方向的分量。也就是说，在不同坐标系中进行度量时，对应于同一个对象的三个数，我们使用相同的符号标记它。正是我们能够说“相同的对象”这个事实蕴涵着一个物理上的直觉观念，这个观念说的是在空间中走一步这件事，它与我们对其进行测量时所用的分量无关。因此，无论我们怎样转动坐标轴，符号r将表示同一个实体。

现在假定有另一个任意的有方向的物理量，任何别的物理量，比如说力，也有三个数与之相联系，如果我们改变坐标系，这三个数就会按照某种数学规则变成三个别的数。这种规则必定与将（x，y，z）变成（x'，y'，z'）所遵循的规则相同。换句话说，任何与三个数相联系的物理量，如果其变换方式与在空间中走一步的分量的变换方式一样，它就是一个矢量。因此，如果一个如下形式的方程

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{r}$$

在某个坐标系中正确，那么它在任何坐标系中都正确。当然，这个方程代表三个方程

$$F_x=x, \quad F_y=y, \quad F_z=z,$$

或者也可以代表

$$F_{x'}=x', \quad F_{y'}=y', \quad F_{z'}=z'.$$

一个物理关系式能够被表示成一个矢量方程，这个事实确保在坐标系只做旋转时，该关系式不会改变。这就是矢量在物理学中为何如此有用的原因。

让我们来考查一下矢量的某些性质吧。作为矢量的例子，我们可以看一看速度、动量、力和加速度。在很多场合下，用一个指示其作用方向的箭头记号表示一个矢量是方便的。为什么我们能够用比如说箭头记号这样的符号表示力呢？这是因为它与“在空间中走一步”具有相同的数学变换性质。因此，我们把它看成好像是在空间中走一步那样，选取适当的比例使力的单位，即1牛顿，对应于某个方便的长度，用图示的方法表示出来。一旦我们这样做了，所有的力都能够用长度表示，因为如下形式的方程

$$F = kr$$

是一个完全合理的方程，其中的k是某个常数。这样，我们就总是能够用直线表示力，这是很方便的，因为一旦画出了直线，就再也不需要坐标系了。当然啦，当三个分量随坐标系转动而改变时，我们能够快速地把它们算出来，因为这仅仅是一个几何学问题。

1-5　矢量代数

我们必须说一下用各种方法将矢量组合起来所要遵循的法则或者规则。第一个这样的组合是两个矢量之和：设a是一个矢量，它在某个特定的坐标系中具有三个分量（a_x,a_y,a_z），而b则是另一个矢量，它具有三个分量（b_x,b_y,b_z）。我们来造三个新的数（a_x+b_x,a_y+b_y,a_z+b_z）。这些数构成一个矢量吗？“唔，”人们也许会说，“它们是三个数，而每三个数就构成一个矢量。”错啦，并不是每三个数都构成一个矢量！为了使它成为一个矢量，不仅需要有三个数，而且这三个数还必须以这样一种方式与坐标系相关联，即当我们转动坐标系时，这三个数会按照我们已经叙述过的确切的规律相互之间“循环出现”，变成彼此“混合在一起”。这样，问题就是，如果我们转动坐标系使（a_x,a_y,a_z）变成（$a_{x'}$，$a_{y'}$，$a_{z'}$），而（b_x,b_y,b_z）则变成（$b_{x'}$，$b_{y'}$，$b_{z'}$），那么，（a_x+b_x,a_y+b_y,a_z+b_z）会变成什么呢？它们会不会变成（$a_{x'}+b_{x'}$，$a_{y'}+b_{y'}$，$a_{z'}+b_{z'}$）呢？答案当然是肯定的，因为原型变换式（1.5）构成一个所谓的线性变换。假如我们把这些变换用到a_x和b_x上得到$a_{x'}+b_{x'}$，就会发现，变换后的a_x+b_x确实与$a_{x'}+b_{x'}$相同。当a和b在这种意义下被“加起来”时，它们将构成一个矢量，可以用c表示它。我们把这个矢量写成

$$c=a+b$$

这个c具有以下颇有意思的性质

$$c=b+a$$

这一点我们从它的分量中马上就能够看出。还有

$$a+(b+c)=(a+b)+c$$

我们可以按照任意次序把矢量加起来。

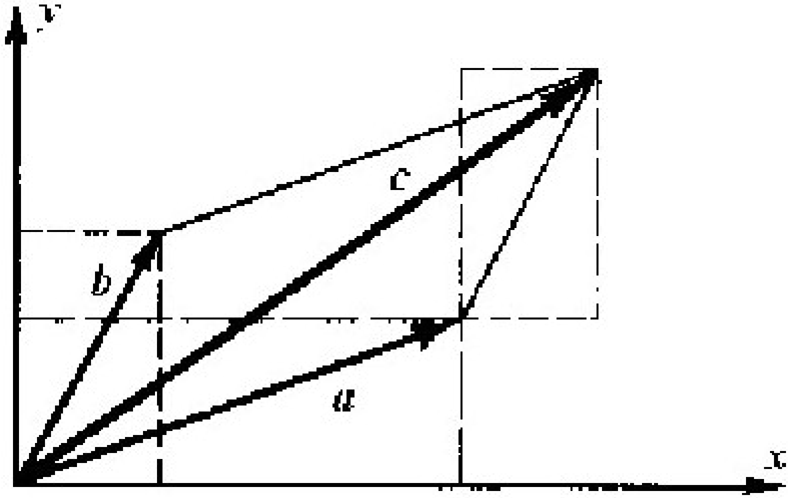


图1-4　矢量加法

a＋b的几何意义是什么呢？如果在一张纸上用直线把a和b表示出来，那么，c是什么样子的呢？结果在图1-4中给出。我们看到，如果将表示b的分量的长方形按图中所示的方式紧挨着表示a的分量的长方形放置，就能够很方便地将b的分量加到a的分量上。由于b正好与它自己的长方形吻合，a也同样与它自己的长方形吻合，因此，这就好像把b的“尾部”放到a的“头部”一样，从a的“尾部”引向b的“头部”的箭头记号就是c矢量。当然，如果我们用另一种方法倒过来把a加到b上，就应该把a的“尾部”放到b的“头部”，利用平行四边形的几何性质就会得到相同的c。请注意，矢量可以按照这种方法加起来而不涉及任何坐标系。

假如我们用一个数α乘一个矢量，这意味着什么呢？我们定义它代表一个分量是αa_x，αa_y和αa_z的新矢量。它的确是一个矢量，我们把它作为一个问题留给学生证明。

下面，我们来考虑矢量的减法。我们可以像定义加法那样定义减法，只是用分量相减代替分量相加。我们也可以这样来定义减法：定义一个负矢量，-b＝-1b，然后把分量相加。用这个方法得到的结果是一样的。结果如图1-5所示。这个图说明d＝a-b＝a＋（-b）；我们还注意到，利用等价的关系a＝b＋d很容易从a和b得到差值a-b。因此，差值甚至比求和更容易得到：只要从b到a画出矢量，就得到a-b了！

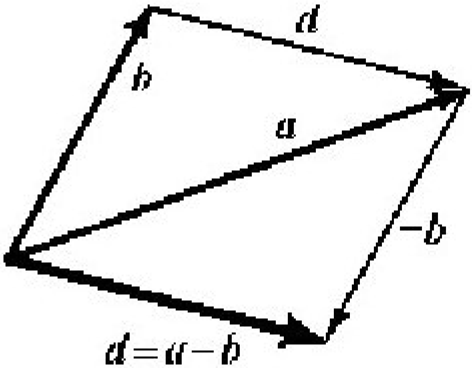


图1-5　矢量减法

接下来我们讨论速度。速度怎么会是一个矢量呢？如果位置用三个坐标（x,y，z）表示，那么速度用什么表示呢？速度是用dx/di,dy/di和dz/di来表示的，这是不是一个矢量呢？我们可以通过对方程（1.5）中的表达式求导数来判断dx'/di是否按照恰当的方式变换。我们看到，分量dx/di和dy/di确实按照与x和y相同的规律变换，因此，这个时间的导数是一个矢量。由此得出速度是一个矢量。我们可以用一种颇有意思的方式把速度写成

$$\nu = dr/di$$

速度是什么，它怎么会是一个矢量，这些问题还可以更形象地去理解：一个粒子在一段短的时间▵i内移动了多远呢？答案是：▵r，因此，如果一个粒子在某一瞬间处于“这里”，而在另一瞬间处于“那里”，那么，位置的矢量差$\triangle r = r_2 - r_1$（如图1-6所示指向运动的方向）被时间间隔$\triangle i = i_2 - i_1$除，就得到“平均速度”矢量。

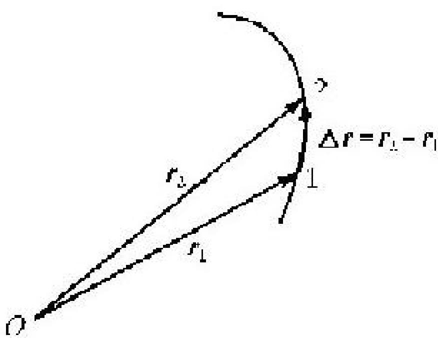


图1-6　一个粒子在一段短的时间间隔$\triangle i = i_2 - i_1$内的位移

换句话说，速度矢量表示这样一种极限，当▵i趋于0时，i＋△i时刻和i时刻径向矢量的差值除以▵i：

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}(\Delta r/\Delta t)=dr/dt \qquad (1.10)$$

由于速度是两个矢量之差，所以它是一个矢量。上述式子也是速度的正确的定义式，因为它的分量就是dx/di,dy/di和dz/di。事实上，我们从这个论证中看到，如果我们将任意矢量对时间求导，就会造出一个新的矢量。由此看来，我们有几个造出新矢量的办法：（1）用一个常数去乘；（2）对时间求导；（3）把两个矢量相加或者相减。

1-6 用矢量法表示牛顿定律

为了写出矢量形式的牛顿定律，我们只需要再走一步，接着定义加速度矢量就够了。这一步就是速度矢量的时间导数，容易证明它的分量是x,y和z对时间i的二阶导数

$$\boldsymbol{a}=\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}=\left(\frac{d}{dt}\right)\left(\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}\right)=\frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2}, \qquad (1.11)$$

$$a_x=\frac{dv_x}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2},\quad a_y=\frac{dv_y}{dt}=\frac{d^2y}{dt^3},\quad a_z=\frac{dv_z}{dt}=\frac{d^2z}{dt^2}. \qquad (1.12)$$

利用这个定义，牛顿定律就可以按这样的方式写出：

$$m\boldsymbol{a}=\boldsymbol{F} \qquad (1.13)$$

或者

$$m\frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2}=\boldsymbol{F}. \qquad (1.14)$$

于是，证明在坐标旋转下牛顿定律的不变性这个问题就是：证明a是一个矢量；我们刚刚做了这个证明。证明F是一个矢量：我们假设它是一个矢量。这样，如果力是一个矢量，那么，由于我们知道加速度是一个矢量，因此，方程（1.13）在任意坐标系下看起来都将一模一样。以一种不显含x,y和z的形式写下牛顿定律具有这样的好处，从今以后，每当我们要写下牛顿方程或者其他物理定律时，再也不需要写出三条定律了。表面上看，我们写下一条定律，但实际上对每一个特定的坐标系，自然就是三条定律，原因就是，任何矢量方程表示，方程两边各个分量相等。

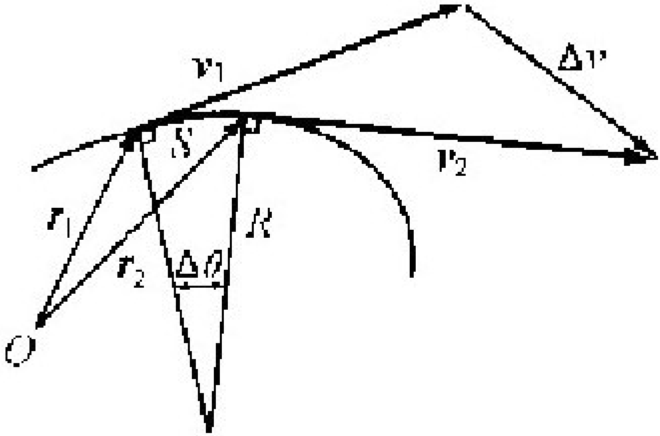


图1-7　一条弯曲的轨道

加速度是速度矢量的变化率，这个事实有助于我们在某些相当复杂的情况下计算加速度。比如说，假设一个粒子正在一条复杂的曲线上运动（图1-7），而且在某个特定的时刻i具有确定的速度ν_1，而当到达另一个稍晚一点的时刻i_2时，它具有不同的速度ν_2。加速度是什么呢？答案是：加速度就是速度之差被这个小的时间间隔除，这样，我们就需要用到两个速度之差。我们如何得到速度之差呢？为了把两个矢量相减，我们过ν_2和ν_1的终点画出这个矢量；即，取△作为两个矢量之差，对吗？不对！只有当矢量的尾部放在同一点上时，上面的做法才行得通！如果我们把矢量移到别的某处再画一条直线过来，就毫无意义了，因此，务必要注意这一点！为了把矢量相减，我们必须画一个新的示意图。在图1-8中，ν_1和ν_2均被画成与图1-7中它们的对应部分平行而且相等，这样我们就能够讨论加速度了。加速度当然就是△ν/△i。有趣的是能够将速度之差分解成两个部分；我们可以把加速度看成具有两个分量，一个是与路径相切方向上的△ν∥，另一个是与路径成直角的△v⊥，如图1-8所示。与路径相切的加速度当然只是矢量长度的改变，即速率v的改变：

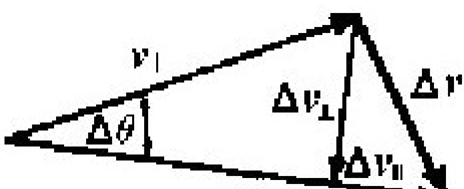


图1-8　计算加速度的示意图

$$a_{\parallel} = dv/dt \tag{1.15}$$

利用图1-7和1-8计算加速度的另一个与曲线正交的分量是很容易的。在短时间△i内，设v_1和v_2之间的角度改变是一个小角△θ。如果速度的大小用v标记，那么，自然就有

$\Delta v_{\perp} = v\Delta\theta$

而加速度a就是

$a_{\perp} = v(\Delta\theta/\Delta i)$

现在我们需要知道△θ/△i的值，它可以按照以下方法求出：在某个确定的时刻，如果曲线近似于某个具有确定半径R的圆，那么，在时间△i内距离S自然就是v△i，其中v是速率。

$\Delta\theta = v(\Delta i/R)$，或者$\Delta\theta/\Delta i = v/R$.

因此得到

$$a = v^2/R, \tag{1.16}$$

与先前见过的一样。

1-7　矢量的标量积

现在进一步考察矢量的性质。容易看出，在空间中走一步的长度在任何坐标系中都相同。这就是说，如果特定的一步r在某个坐标系中用x,y，z表示，而在另一个坐标系中则用x'，y'，z'表示，那么，走过的距离T＝|r|在两个坐标系中肯定会相同。于是有

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

同样还有

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}.$$

因此，我们希望证明的是这两个量相等。不用为计算平方根而操心就更加方便，因此，我们来讨论距离的平方吧；这就要搞清楚下面的等式是否正确，

$$x^2 + y^2 + z^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2. \tag{1.17}$$

这个式子成立就最好不过了——如果我们将方程（1.5）代入上式，就发现结果确实是这样的。由此可见，还有另外一些类型的方程在任意两个坐标系中是正确的。

某些新的东西被卷进来了。我们可以造一个新的量，一个x,y和z的函数，称之为标量函数，这是一个没有方向，但在两个坐标系中相同的量。我们可以用一个矢量来造出一个标量。我们必须为此找到一个一般的规则。显然，对于刚才讨论的例子，所要的规则就是：把分量的平方加起来。我们现在来定义一个写成a·a的新的运算。这不是一个矢量，而是一个标量；它是一个在所有坐标系中都一样的数字，它被定义为矢量的三个分量的平方和：

$$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{a}=a_x^2+a_y^2+a_z^2. \tag{1.18}$$

你也许会问，“可是用哪个坐标系去计算呢？”它与坐标系无关，答案在每个坐标系中都一样。于是，我们有了一类新的量，通过对一个矢量进行“平方”运算造出来的新的不变量或标量。如果我们现在用任意两个矢量a和b来定义下面这个量：

$$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}=a_xb_x+a_yb_y+a_zb_z. \tag{1.19}$$

就会发现，无论在带撇号的还是在不带撇号的坐标系中进行计算，这个量也都是一样的。为了证明这一点，我们要记住，a·a,b·b和c·c都有这个结论，其中c＝a＋b。因此，平方和

$$(a_x+b_x)^2+(a_y+b_y)^2+(a_z+b_z)^2$$

并不改变：

$$\begin{aligned}&(a_x+b_x)^2+(a_y+b_y)^2\ (a_z+b_z)^2=\\&(a_{x'}-b_{x'})^2+(a_{y'}+b_{y'})^2+(a_{z'}+b_{z'})^2.\end{aligned} \tag{1.20}$$

如果把这个方程的两边展开，就会出现方程（1.19）给出的那种交叉乘积项，以及a和b的分量的平方和。方程（1.18）那种形式的项的不变性就会使交叉乘积项（1.19）也不变。

a·b这个量叫做两个矢量a和b的标积，它具有许多有趣的和有用的性质。比如说，容易证明

$$\boldsymbol{a}\cdot(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c})=\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}+\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c}. \tag{1.21}$$

还有，有一种不需要计算a和b的分量就可以计算a·b的简单的几何方

法：a·b等于a的长度与b的长度的乘积再乘它们之间的夹角的余弦。为什么会这样呢？假定我们选取一个特殊的坐标系，它的x轴沿着a的方向；在这种情况下，a的仅有的分量就是a_x，它自然就等于a的整个长度。这样，对于这个例子而言，方程（1.19）就简化成$a\cdot b = a_x b_x$，而这就是a的长度乘b在a方向的分量，即bcosθ：

$$a\cdot b = ab\cos\theta$$

因此，在上面这个特殊的坐标系中，我们已经证明了a·b等于a的长度乘b的长度再乘cosθ。可是，由于a·b与坐标系无关，因此，如果它在一个坐标系中成立，那么，在所有的坐标系中也成立；这就是我们的论证。

点乘有什么用处呢？在物理学中有哪些场合我们用得上它呢？当然有，我们随时都要用到它。比如说，在原先的《物理学讲义》的第一卷第四章中，动能被表示成$mv^2/2$，但是，如果物体在空间中运动，速度的平方就应该是在x方向、y方向和z方向的分量的平方和，因此，根据矢量分析法，动能的公式就是：

$$K.E. = \frac{1}{2}m(\boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{v}) = \frac{1}{2}m(v_x^2+v_y^2+v_z^2). \qquad (1.22)$$

能量并没有方向。动量就有方向了，它是一个矢量，是质量乘速度矢量。

另一个点乘的例子是，当某个物体从一个地点被推向另一个地点时力做的功。我们还没有给功下过定义，不过，它与能量发生改变和重物被提升具有同等的意义，当一个力F作用了一段距离s时：

$$\text{功} = \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{s}. \qquad (1.23)$$

讨论一个矢量在某个方向（比如说竖直方向，那是万有引力的方向）上的分量有时是非常方便的。为了这样做，在我们想要研究的方向上引入一个所谓的单位矢量是很有用的。单位矢量是这样一个量，它与自身点乘等于1。就把这个单位矢量写成i吧；于是$i\cdot i = 1$。于是，假如我们想求出某个矢量在i方向上的分量，我们看到点乘a·i等于acosθ，这就是a在i方向上的分量。这是一个求分量的极好的方法；事实上，这个方法能够使我们求出所有分量，并写出一个很有意思的公式。假定在一个给定的坐标系x,y和z中，我们引入三个矢量：一个沿x方向的单位矢量i；一个沿y方向的单位矢量j；一个沿z方向的单位矢量k。首先记住$i\cdot i = 1$，但是i·j等于什么呢？当两个矢量相互垂直时，它们的点乘等于0。于是

$$
\begin{aligned}
&\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{i}=1\\
&\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{j}=0\quad \boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{j}=1\\
&\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{k}=0\quad \boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{k}=0\quad \boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{k}=1
\end{aligned}
\tag{1.24}
$$

利用上面的规定，无论什么矢量都可以写成下面的形式：

$$\boldsymbol{a}=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}+a_z\boldsymbol{k}. \tag{1.25}$$

利用这个方法就能够从一个矢量的分量求出这个矢量本身。

上述关于矢量的讨论并不完整。不过，与其现在设法更深入地研究这个问题，倒不如先学会把目前为止所讨论过的一些概念应用于实际领域中。然后，当我们完全掌握了这个基本内容之后，就会发现，要更深刻地理解这个问题而又不被搞得手忙脚乱就容易得多了。稍后我们就会发现，定义两个矢量的另一种乘积是有用的，这种乘积叫做矢量积，写成$a\times b$。不过，我们将在稍后的章节中再讨论这样的问题。



第二章　物理定律的对称性

2-1　对称操作

这一章的主题可以称为物理定律的对称性。我们已经在矢量分析（第一章）、相对论（接下来的第四章）和旋转问题（第二十章[5]）中讨论过物理定律的对称性的一些性质了。

我们为什么要关心对称性这个问题呢？首要的理由是，对称性对人类的心智具有迷人的魅力，每一个人都喜好具有某种对称性的物体或者图案。大自然常常在我们这个大千世界的事物身上展现出某种对称性，这是一个极为引人入胜的事实。能够想象出的最对称的物体也许就是一个球体了，大自然到处都是球形的物体——恒星、行星和云中的小水滴。在岩石中找到的晶体展现出各种不同类型的对称性，对它们的研究给予我们有关固体结构的一些重要知识。即使是动植物的世界也展现出某种程度的对称性，尽管一朵花的对称性或者一只蜜蜂的对称性并不如晶体的对称性那样完美或者重要。

不过，我们在这里主要关心的并不是“大自然中的事物常常是对称的”这样一个事实。恰恰相反，我们倒是宁愿考察一下宇宙中某些更值得注意的对称性——存在于支配物质世界运作的基本定律自身中的对称性。

首先要问，什么是对称性？一条物理定律怎么会是“对称的”呢？定义对称性是一件有趣的事情，我们已经说过，外尔对此下过一个很好的定义，这个定义的实质是说，如果我们能够对一件东西做某种事情，做完之后，这件东西看上去与原先一模一样，那么，就说这件东西是对称的。比如说，一个对称的花瓶就是这样的东西，如果我们使它反射或者旋转，它看上去将会与原先一模一样。我们在这里想要考虑的问题是，对自然现象或者实验中的实际情形，我们能够做些什么而保持结果不发生变化。表2-1列出了使各种自然现象保持不变的已知的操作。

表2-1　对称操作

空间平移
时间平移
转过一个确定的角度
匀速直线运动（洛伦兹变换）
时间反演
空间反射
全同原子或者全同粒子的交换
量子力学的相位
物质–反物质（电荷共轭）

2-2　时空对称

我们可以试着去做的第一件事，比如说，就是对空间中的现象进行平移。假如我们在某个地方做一个实验，然后在空间中另一个地方建造另一套设备（或者把原来的设备搬过去），那么，只要安排好了相同的条件，并充分注意到前面提到的约束规则：即所有使机器不以相同方式运转的外部性质也都被移走，那么，在前一套设备中按照确定的时间顺序无论发生过什么事情，在后一套设备中都将以相同的方式出现。我们在前面讲过如何确定在上述情况下应该包括多少这样的因素，这里就不再深入地讨论这些细节了。

我们今天也同样相信，时间平移对物理定律没有任何影响。（这是就我们目前所知而言——所有这些现象都是就我们目前所知而言的！）这就意味着，如果我们建造一套设备并在某个时刻，比如说在星期四早上10：00启动它，然后再造一套相同的设备，并在比如说3天之后在相同的条件下启动它，那么，无论在何时启动，这两套设备将以完全相同的时间依赖方式表现出相同的动作，当然，还是要规定，外界的有关性质也要及时地得到适当的修正。这种对称性自然就意味着，如果一个人在3个月以前买进通用汽车公司的股票，那么，发生在这些股票上的事情就如同他现在买进它一样！

我们还必须密切留意地理上的差异，原因自然是因为地球表面的性质变化多端。这样，举例来说，如果我们在某个地区测量磁场，然后将测量仪器搬到某个别的地区，那么，由于磁场不一样，测量仪器就有可能不会以完全相同的方式工作，不过，我们认为，这是因为磁场往往与地球有关的缘故。我们可以设想，如果把整个地球和测量仪器一起搬动，那么，仪器的测量操作就没有任何差异。

我们相当详细地讨论过的另一个问题是在空间中的旋转：如果我们把一套设备转过一个角度，并且将与其相关的其他所有因素也一起转动，那么，这套设备就会像未转动时一样运转。其实，我们在第一章中

比较详细地讨论过在空间转动下的对称性问题，并且发明了一种叫做矢量分析的数学方法，以尽可能简洁地处理它。

在一个更高的层次上，我们有另一种对称性——匀速直线运动的对称性。这种极不寻常的效应认为，如果我们有一台用某种方式运转的设备，现在把这台设备放到一辆汽车上，并使汽车以及所有相关的外界条件以均匀的速度沿直线前进，那么，汽车内的现象就没有什么不一样的：所有的物理定律看起来一模一样。我们甚至知道该如何用专门的方式表达这一点，那就是，反映物理定律的数学方程在洛伦兹变换下必定不变。事实上，正是对有关相对论问题的研究，使物理学家将注意力集中到物理定律的对称性这个问题上来。

上面所谈到的对称性全都具有几何学的性质，时间和空间多少有点相似，不过，还有另外一种不同类型的对称性。比如说，有一种对称性描述了这样的事实：一个原子能够用同类的另一个原子替换；换句话说，存在着同一种类的原子。有可能找到这样的原子集团，如果我们把其中的一对原子互换，那么不会造成任何差异——这些原子都是一模一样的。在某种类型的氧原子中，无论一个原子有什么行为，这类氧原子中的另一个原子也会有同样的行为。有人会说，“真是荒唐，这正是同一种类的定义！”这可能只是一个定义，但是我们还是不知道是否存在任何“相同类型的原子”；事实是存在许许多多相同类型的原子。因此，当我们说“用同一类型的一个原子替换另一个原子不会带来任何差异”这句话时，确实是有意义的。构成原子的那些所谓基本粒子，在上述意义下也是全同粒子——所有的电子都是相同的；所有的质子都是相同的；所有带正电荷的介子都是相同的；如此等等。

在列出了这么多使物理现象不改变的操作之后，有人可能以为，实际上我们可以做任何事情了；那就让我们举一些反例，以便看到出现有差异的情况。假设我们提出这样一个问题：“物理定律在尺度变换下是对称的吗？”设想我们先造一台设备，然后再造另一台每个部件都大5倍的设备，这两台设备会以完全相同的方式工作吗？在这种情况下，答案是，不会！比如说，由一箱钠原子发出的光的波长与由5倍体积的钠气发出的光的波长相比，后者就不是前者的5倍，而是完全相等。因此，波长与发射体的尺度之比就会改变。

另一个例子是：在报纸上，我们有时会看到一座用小火柴棍搭成的大教堂的照片——由一些退休人员用火柴棍黏成的惊人的艺术品。它比任何真实的大教堂更精巧、更奇特。如果我们想象这个木制的大教堂真的按实际尺寸建起来，就会看到麻烦出在哪里了：它不会存在下去——整座教堂都会倒塌，原因就在于放大了的火柴棍强度完全不够。“是的，”可能有人会说，“但是，我们也知道，当存在一种来自外界的影响时，它也必定按比例改变！”这里谈论的是物体承受万有引力的能力。因此，我们首先要有真实的火柴棍造的大教堂模型和真实的地球，我们知道它是稳固的。然后，我们就该有更大的大教堂和更大的地球。可是，这样的话情况甚至更糟，因为万有引力增加得更快！

当然，我们今天是根据自然界中的物质由原子构成这一点来理解现象依赖于尺度这个事实的，显然，如果我们建造一台小到里面只有5个原子的仪器，那么，它肯定是一件我们不能任意放大和缩小的东西。单个原子的尺度根本不是任意的，而是完全确定的。

物理定律在尺度变换下并非不变这个事实是伽利略发现的。他认识到材料的强度与它们的大小并非恰好成正比关系，并且画了两根骨头来说明我们刚才在火柴棍大教堂的问题中讨论过的性质，在他画的图中，一根是按支撑体重的适当比例画出的狗的骨头，一根是假想的，比方说大10倍或100倍的“超级狗”的骨头——这根骨头是一个按完全不同的比例画出的结实的庞然大物。我们不知道他是否曾经用这个论据得出过这样一个结论：自然定律必定具有明确的尺度，不过，他把这个发现与运动定律一起写进了叫做《关于两种新科学的问题》这本书中，由此可见这个发现给他的印象是如此深刻，以至他把两者看得同样重要。

另一个我们了解得相当清楚的物理定律并不对称的例子是：一个以匀角速度旋转的系统，其中的表观定律与一个不旋转的系统中的定律并不相同。假如我们安排一个实验，然后把所有的东西都搬到一艘宇宙飞船中，并让飞船在宇宙空间中始终以不变的角速度自转，那么，上面的仪器就不会按原来的样子工作，因为我们知道，仪器内部的零件会由于离心力或者科利奥里力等原因被抛向飞船的外侧，如此等等。事实上，我们不需要往外看，只要利用一个叫做傅科摆的仪器就能够觉察到地球正在旋转。

下面我们讲一个非常有趣却明显错误的对称性，即时间上的可逆性。物理定律在时间上显然是不可逆的，因为我们知道，所有显而易见的现象在大尺度上都是不可逆的：“大笔一挥，江山写就，意犹未尽。”就目前为止我们的认识而言，这种不可逆性起因于大量粒子的参与，如果我们可以看见单个分子，就无法分清机器到底是朝时间的正方向还是反方向运转。说得更准确点就是：造一台小小的仪器，我们知道其中所有原子的行为，能够看见它们在左摇右晃地运动。现在我们造另一台与之相似的仪器，它在前者的终态条件下开始工作，但所有的速度正好相反。那么，这台仪器将经历相同的但却完全反向的运动。换句话说：如果我们拍一部电影，足够详细地拍下一块材料的所有内部运作，然后放映到屏幕上，还要倒着放，那么，没有一个物理学家能够说，“这是违反物理定律的，这里面有些地方搞错了！”当然，如果我们不去观察所有的细节，情况就是完全清楚的。如果我们看见鸡蛋掉在人行道上，蛋壳破裂，如此等等，就肯定会说，“这是不可逆的，因为如果我们把电影倒着放，破碎的鸡蛋就会聚集起来，蛋壳就会拼回原样，这显然是荒谬的！”不过，如果我们观察单个原子本身，定律看起来就完全是可逆的。当然，要发现这一点就难得多了，不过，很明显，在微观的和基本的层级上，基本物理定律在时间上确实是完全可逆的。

2-3 对称性与守恒定律

在目前这个层次上，物理定律的对称性是非常吸引人的，不过，最终发现，当我们转到量子力学时，这种对称性变得更加引人入胜和令人激动。在量子力学中，由于某种我们无法在目前的水平上理解的原因，每一种对称规则都有一条守恒定律与之相对应；在守恒定律和物理定律的对称性之间存在着确定的关系——这是一个令绝大多数物理学家至今仍然感到有点难以置信的事实，是一件最深刻和最优美的事物。目前我们只能做这样的说明，不打算做任何解释。

举个例子吧，当与量子力学的原理相结合时，物理定律在空间平移下是对称的这个事实意味着动量守恒。

在量子力学中，物理定律在时间平移下是对称的则意味着能量守恒。

在空间中转过一个确定的角度时的不变性对应于角动量守恒。这些联系是非常有趣和非常优美的，在物理学领域属于最优美和最深刻的思想之列。

顺便提一下，在量子力学中出现的不少对称性并没有经典类比，在经典物理学中，没有任何描述它们的方法。其中之一就是：假如ψ是某个过程的概率振幅，那么，我们就会知道，ψ的绝对值的平方就是这个过程发生的概率。好，如果另外有人在进行计算时打算不用这个ψ，而是用一个不同的ψ＇，它只是改变了相位（令△是某个常数，并用$e^{i\Delta}$乘原来的ψ），那么，ψ＇的绝对值的平方，即事件的概率，就等于ψ的绝对值的平方：

$$\psi' = \psi e^{i\Delta};\quad |\psi'|^2 = |\psi|^2 \tag{2.1}$$

因此，如果波函数的相位改变任意一个常数，物理定律是不变的。这是另一种对称性。物理定律必定具有这种性质，即量子力学相位的改变不会引起任何差异。正如我们刚刚提到的，在量子力学中，对应于每一种对称性，都存在一个守恒定律。与量子力学相位相联系的守恒定律看来就是电荷守恒。总而言之，这是非常引人入胜的事情！

2-4　镜像反射

现在讨论下一个问题，即在空间反射下的对称性问题，这个问题将与本章其余大部分内容有关。问题是这样的：物理定律在反射操作下是对称的吗？我们也可以这样问：假如我们造了一台设备，比如说一个带有许多齿轮、指针和数字的时钟；它滴答滴答地走着、工作着，在它的内部有一些绷得紧紧的发条。我们在镜子中来看这个时钟。在镜子中它看起来像个什么样子无关紧要。但是，让我们实实在在地造另一个时钟吧，它与上面那个时钟在镜子中的模样完全相同——每当在原来那个时钟内有一个右旋螺纹的螺丝，我们就在镜像时钟内对应的位置安装一个

左旋螺纹的螺丝；在原来的时钟钟面上标有“2”的位置，我们就在镜像时钟的钟面上标上“c”这个标记；每一卷发条在原来的时钟内以一种方式缠绕，在镜像时钟内则以另一种方式缠绕；当我们把这一切做完时，我们就有了两个都是用实物做的时钟，尽管我们强调它们都是实际存在的、用真实的材料做成的时钟，但是，它们却按照一个物体与其镜像之间的关系相互映射。现在的问题是：如果两个时钟在相同的条件下（即发条上得一样紧）开始计时，那么，这两个时钟会不会滴答滴答地一直走下去，就像一对精确的镜像那样呢？（这是一个物理学问题而不是一个哲学问题。）我们对物理定律的直觉认为，它们会这样。

我们可能会觉得，至少就这些时钟而言，空间反射是物理定律的一种对称性，如果我们把每一样东西都从“左”变到“右”，而其他方面则保持不变，我们就无法判断变化前后的差别。接下来让我们暂时假设这是对的。如果确实是这样，那么，就不可能通过任何物理现象区分“左”和“右”，这正如，不可能通过某种物理现象确定某个绝对速度一样。因此，不可能通过任何物理现象绝对地确定所谓与“左”相对的“右”指的是什么，因为物理定律应该是对称的。

当然，这个世界并非一定是对称的。举例来说，利用所谓的“地理学”，“右”肯定能够被确定下来。例如，我们站在新奥尔良朝芝加哥看去，佛罗里达就在我们的右边（只要我们站在地面上！）。因此，我们能够利用地理学来确定“左”和“右”。当然，在任何系统中，实际状况并非一定具有我们正在谈论的对称性；这里谈到的问题是，定律是否是对称的——换句话说，如果有一个像地球一样的天体，构成它的尘土都是“左”旋的，而且有一个像我们一样的家伙正站在一个像新奥尔良那样的地方往像芝加哥那样的城市看去，但是由于所有的东西都反了过来，因此，佛罗里达就在另一边了，这种情况是否违反物理定律呢？显然，使每一件东西都左右互换看来并非不可能，这并不违反物理定律。

另外一个要点是，我们对“右”的定义不应该依赖于历史事件。区分左和右的一个简易办法就是跑到机械零件商店去随便捡一颗螺丝。多数会拿到具有右旋螺纹的——未必一定是右旋的，不过，拿到右旋螺纹的机会比拿到左旋螺纹的机会大得多。这是一个历史遗留下来的或者叫做习俗的问题，或者是偶然得到的结果，并不是一个基本定律的问题。我们清楚地意识到，人人都能够着手制造左旋螺纹的螺丝！

因此，我们必须想办法找到一些从根本上说包含“右旋”的现象。我们讨论的下一个可能性是偏振光通过，比如说，通过糖水时其偏振面发生旋转这个事实。正如我们在第33章[6]中看到的那样，在某种糖溶液中偏振面会，比如说，向右旋转。这就是一个定义“右旋”的方法，因为我们可以把一些糖溶解在水里，就使偏振面转向右边。不过，糖来自生物体，如果我们尝试人工合成糖，就会发现它并不会令偏振面旋转！但是，如果我们接着在同样这些不会令偏振面旋转的人造糖中放进一些细菌（它们吃掉一些糖），然后滤去细菌，就会发现仍然留下一些（几乎是原来的一半那么多）糖，这一次它确实使偏振面旋转了，但却向相反

的方向旋转！这看起来极其令人费解，不过却很容易加以解释。

再举一个例子：所有生物体都含有的物质之一是蛋白质，它对生命来说是非常重要的。蛋白质由氨基酸链构成。图2-1显示出一种由蛋白质产生出来的氨基酸的模型。这种氨基酸叫做丙氨酸，如果它是由真实的生物体内的蛋白质产生的，那么，分子的排列就会像图2-1（a）中看起来那样。另一方面，如果我们试图用二氧化碳，乙烷和氨合成丙氨酸（我们能够把它合成出来，它并不是一个复杂的分子），那么就会发现，我们正在合成数量相等的两种分子，一种如上所述，另一种如图2-1（b）所示！第一种分子，即来自

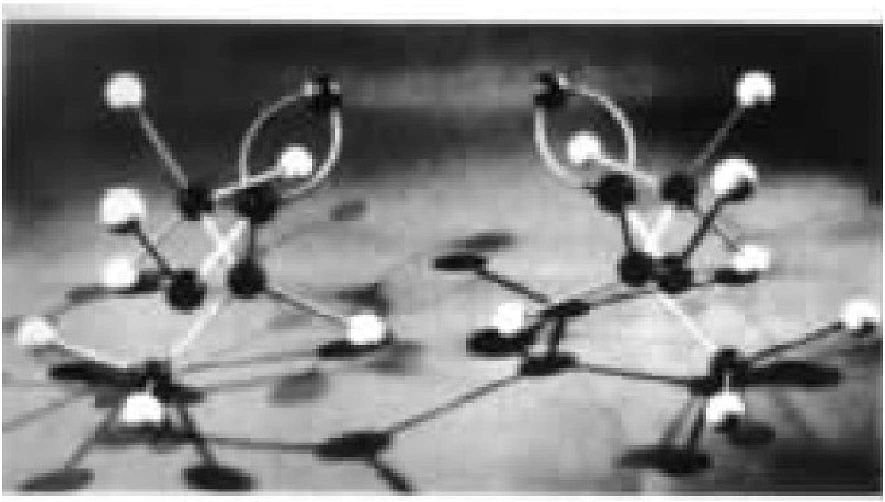


图2-1　（a）L丙氨酸（左），（b）D丙氨酸（右）

生物体内的分子叫做L丙氨酸。另一种分子，因为具有同种类的原子和原子间的关联，因此其化学成分一模一样，与“左旋的”L丙氨酸相比，是一种“右旋的”分子，叫做D丙氨酸。有趣的是，当我们在实验室中用简单的气体合成丙氨酸时，就得到两类丙氨酸分子的等量混合物。然而，生物体只利用L丙氨酸（这并不完全正确。D丙氨酸在生物体内各处都有一些特别的用途，但非常罕见。所有蛋白质都只利用L丙氨酸）。现在，如果我们把两种丙氨酸都合成出来，并用这种混合物喂养某些喜欢“吃”，或者叫做消耗丙氨酸的动物，由于动物不能利用D丙氨酸，因此，它就只利用L丙氨酸；这就是在我们的糖中出现的事情——细菌吃了对它们有用的糖之后，只有那些“不合用的”分子被保留下来！（左旋糖是甜的，但右旋糖的味道就不一样了。）

这样看来，生命现象似乎能够区分“左”和“右”，或者化学也能够这样做，原因就是，两种分子在化学上并不相同。可是，实际上并非如此！就所能够进行的物理测量来说，比如说能量、化学反应率等，如果我们让其他因素也做镜像反射，那么，两种分子就会起完全相同的作用。一种分子会使光往右旋，而另一种分子，当光通过相同数量的液体

时，会使其左旋完全相同的角度。因此，就物理学而言，这两种氨基酸同样符合要求。就我们今天对事物的理解来说，薛定谔方程的基本原理表明，两种分子应该表现出完全对应的行为方式，因此，一种分子起左旋的作用，而另一种分子则起右旋的作用。尽管如此，在生物体内却只有一种方式起作用！

人们推测，之所以这样有以下几方面的原因。比方说，设想由于某种原因，在某一时刻生命处于这样一种状态下，某些生物体内所有蛋白质都含有左旋氨基酸，而所有酶都是有倾向性的——生物体内每一种物质都是有倾向性的——也就是不对称的。这样，当消化酶要将食物中的化合物从一种物质变成另一种物质时，其中的一类化合物与酶“相配”，而另一类就不相配（就像灰姑娘和她的水晶鞋一样，只不过我们在试穿的是一只“左脚”鞋）。就我们的认识而言，比如说，原则上我们可以培育出这样一只青蛙，其中所有分子都被翻了过来，所有东西都像一只真实的青蛙的“左旋”镜像一样；我们培育出了一只左旋蛙。这只左旋蛙有一阵子会过得很好，但是，它会发现找不到东西吃，因为如果它吞下一只苍蝇，它产生的酶无法去消化它。组成苍蝇的是“不合用的”一类氨基酸（除非我们给它一只左旋蝇）。就我们目前所知，如果所有东西都翻过来的话，化学过程和生命过程将照样进行下去。

如果生命完全是一种物理的和化学的现象，那么，蛋白质全都由相同螺旋性的分子组成这个事实就只有这样来理解：在开天辟地之时，由于偶然的因素而出现了某些生命分子，其中有一些得到繁衍。在某个地方，有一次一个有机分子带有一定的倾向性，从这次特殊的事件开始，“右旋”碰巧在我们这个特殊的地理环境下发展起来；一件特殊的、偶然的历史事件是有倾向性的，可是从那时起，这种倾向性本身就传播开来。当然，一旦演化到了现在的状态，它就将会持续下去——所有的酶都消化和生产右旋的东西：当二氧化碳和水蒸气等物质进入植物的叶子时，造糖的酶使它们出现倾向性，因为酶是有倾向性的。如果任何新的病毒或者生物种类要在稍后时出现，那么，它只有能够“吃”现存的生命物质才能存活下去。因此，它也就必须是同一类的生物。

不存在右旋分子的数目守恒这回事。右旋分子一旦出现了，其数目就会持续不断地增加。人们由此推测，生命现象并不表明物理定律中缺乏对称性，恰恰相反，在上述含义下，它确实显示出地球上一切生命的根本来源的共同性。

2-5　极矢量和轴矢量

下面做进一步的讨论。我们注意到，物理学领域在许多其他场合下都有“左手法则”和“右手法则”。事实上，当我们学习矢量分析的知识时，就学习过为了正确地表示角动量、力矩、磁场等物理量而必须使用的右手法则。例如，一个在磁场中运动的电荷所受到的力是$F=qv\times B$。在已知F，v和B的情况下，这个公式是否足以确定右手性呢？事实上，

如果我们回过头来看一看矢量的来由，就会发现"右手法则"只不过是一种约定，是一种巧妙的方法。角动量和角速度以及前面所讲到的诸如此类的物理量根本就不是真正的矢量！它们全都以某种方式与某个平面相关，只是因为空间有三维，才使我们能够将这种量与垂直于那个平面的一个方向联系起来。在两个可能的方向中，我们选择了"右旋"的方向。

因此，假如物理定律是对称的，我们就会发现，如果有一个精灵偷偷地溜进所有的物理实验室，并在每一本讲到"右手定则"的书中将"右"字改为"左"字，以至我们全都统一使用"左手定则"，那么，将不会给物理定律带来任何差异。

我们来做一些说明。存在两类矢量，有一类是"真正的"矢量，比如空间中的位移△r。如果在我们的仪器中这里有一个零件，那里有另一件别的东西，那么，在一个镜像仪器中就会有这个零件的像和另一件东西的像，如果我们从这个"零件"向"另一件东西"画一个矢量，那么，一个矢量就是另一个矢量的镜像（图2-2）。矢量的箭头改变了方向，就好像整个空间翻转过来一样；我们把一个这样的矢量叫做极矢量。



图2-2　空间中的位移和它的镜像

但是，另一类与旋转有关的矢量具有不同的性质。例如，设想在三维空间中某个物体如图2-3所示那样旋转。如果我们在一面镜子中看它，那么，它就会如图所示那样旋转，即像原来旋转的镜像那样旋转。现在，我们约定用相同的规则表示镜像旋转，它是一个"矢量"，在空间反射下并不像极矢量那样改变，而是相对于极矢量和空间的几何关系而言在方向上被颠倒过来；一个这样的矢量叫做轴矢量。

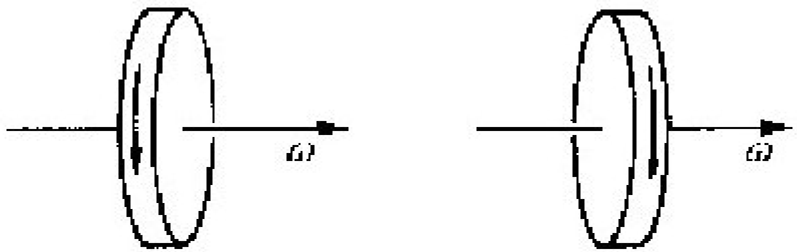


图2-3　一个转轮和它的镜像，注意角速度"矢量"在方向上没有被颠倒

好，如果反射对称定律在物理学中是正确的，那么，物理方程就必须是这样设计出来的：如果我们将每一个轴矢量和矢量的每一个叉乘的正负号改变（这与反射相对应），就不应该有任何差别。举例来说，当我们写下一个表示角动量$L=r\times P$的公式时，这个公式就是完全正确的，原因就是，如果我们变换到左手坐标系，就改变了L的正负号，而P和r却不改变；由于我们必须将右手定则换成左手定则，所以，叉乘的正负号就要改变。再举另一个例子，我们知道，作用于一个在磁场中运动的电荷上的力是$F=q\nu\times B$，但是，如果我们从右手系变成左手系，由于已知F和ν是极矢量，因此，由叉乘引起的变号必须被B的变号抵消，这就意味着B必须是一个轴矢量。换句话说，如果我们进行这样一个反射，B必定变成-B。因此，如果我们将坐标系从右手系变成左手系，也必定把磁极从南极变成北极。

我们用一个例子来说明这种情况吧。设想我们有两块磁铁，如图2-4所示。一块磁铁上的线圈朝某个方向缠绕，电流沿着某个方向流过线圈。另一块磁铁看上去就像是第一块磁铁在一面镜子中的映像一样——线圈将朝另一个方向缠绕，发生在线圈中的所有现象完全被颠倒过来，电流的走向如图所示。好，利用产生磁场的定律（我们还未正式讨论过这一点，不过很有可能在中学里学过）求出的磁场如图所示。如果一块磁铁的某个磁极是南磁极，那么，在另一块磁铁上，电流沿着另一个方向流过，磁场被颠倒过来，对应的磁极就是北磁极。于是我们看到，当我们从右旋变为左旋时，确实把北磁极与南磁极互换了！

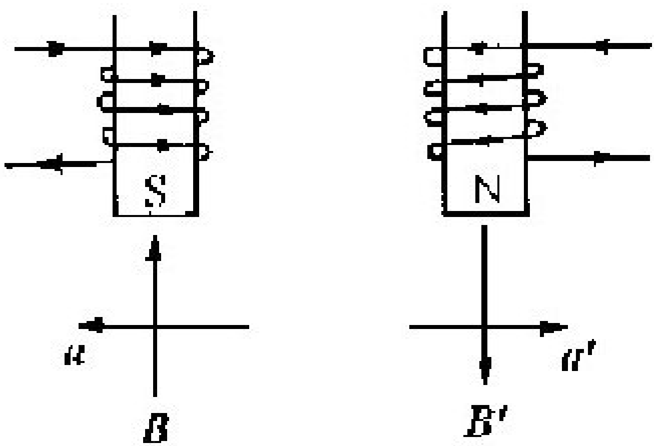


图2-4　一块磁铁和它的镜像

不必介意南北磁极的改变；这些也只是约定而已。让我们来谈谈现象吧。假定现在有一个在磁场中运动的电子进入纸面上。于是，如果我们利用公式$q\nu\times B$（记住电荷是负的）求电子的受力，就会发现电子将朝着物理定律指定的方向偏转。因此，我们看到的现象就是，在一个线圈内朝指定的方向流过电流，一个电子以某种方式弯曲——这就是物理学的内容——它不管我们如何标记每件事物。

现在，我们用一面镜子做同样的实验：我们朝对应的方向发射一个电子，这时，力的方向颠倒过来，如果我们用相同的规则做计算的话，那么，由于对应的运动是镜像运动，因此，得到的结果完全正确！

2-6　到底哪一只是右手

这样看来，实际的情况是，在研究任何现象时总是有两种或者偶数种正确的手性规则，而最终的结果是，现象看起来总是对称的。因此，简而言之，倘若我们连南极和北极都分辨不出，也就无从分辨左手和右手。可是，表面上看我们能够辨认出磁铁的北极。比如说，指南针的北极是指向北方的一根指针。不过，这当然也是一种局部的性质，它必须根据地球上某一地区的自然特征做出判断；这只不过就像谈论芝加哥在哪个方向一样，是不算数的。如果我们见过指南针，就可能会注意到指向北极的指针是浅蓝色的。可是，这只不过是人们涂到磁铁上的颜色。这些性质全都是局部性的、人为约定的判断准则。

然而，假如一块磁铁真的具有这样一种性质，当我们足够近地观察它时，就会看到细小的绒毛在它的北磁极上而不是在南磁极上长出来，如果这是一般的规则，或者如果存在任何惟一的方法可以把北磁极和南磁极区分开，那么，我们就可以辨别出两种情形中我们实际上看到的是哪一种，而这将会是反射对称律的终结。

为了更清楚些说明整个问题，设想我们正在与一个火星人或者某个离得非常非常远的人通过电话交谈。我们不能向他发送任何用做检验的实际的样品；比如说，如果我们可以传送光信号，就可以向他发送右旋圆偏振光，并且对他说，“这是右旋光——只要检查一下它的旋转方向就知道了。”可是，我们不能向他发送任何东西，只能与他交谈。他离得很远，或者在某个奇怪的地方，看不到任何我们能够看到的东西。比如说，我们不能说，“看一看大熊星座；好，留意那些星星是怎样排列的。我们所指的‘右’是……”我们只能通过电话与他交谈。

现在，我们想要把有关我们的一切都告诉他。当然，我们首先从定义数字开始，于是这样说，“滴答，滴答，2，滴答，滴答，滴答，3，……”这样，他逐渐地能够理解一些单词了，就这样做下去。过了一会儿，我们就有可能变得跟这个家伙非常熟了，接着他就会说，“你们这些家伙长了个什么模样呢？”我们就开始描述自己了，对他说，“噢，我们有6英尺（1英尺约为0.3048米）高。”他说，“等一下，6英尺是什么意思？”有可能告诉他6英尺是什么意思吗？当然有可能！我们对他说，“你知道氢原子的直径吧，我们有17000000000个氢原子那么高！”之所以能够这样说，原因就是物理定律在尺度变换下是不变的，因此，我们能够定义一个绝对长度。我们就这样说明了身体的大小，并告诉他体型大致上如何——我们的身体有一些像丫叉一样的东西，丫叉的末端伸出5个突出来的玩意儿，如此等等，他顺着我们的描述进行想象，我们就这样描述完了我们的外表长得怎样，这大概不会遇到任何特

别的困难。在我们描述自己的过程中，他甚至做出一个我们的外形的模型来。他说，“哎呀，你们一定是非常英俊的家伙；那么身体里头有什么呢？”于是我们开始描述身体里头的各种器官，我们说到心脏，我们仔细地描述了它的形状，对他说，“好，把心脏放在左边。”他说，“嗯……左边？”我们现在的问题就是，要向他描述心脏在哪一边，而他则看不到任何我们所看到的东西，我们也不向他发送任何说明“右”是什么的样品——没有任何标准的右旋物体。我们做得到吗？

2-7　宇称不守恒了

研究结果表明，万有引力定律、电磁定律、核力都满足反射对称原理，因此，这些定律，或者由它们导出的任何结论都派不上用场。不过，有一种现象，它与自然界中发现的许多粒子有关，叫做0衰变，或者叫做弱衰变。弱衰变的其中一个例子与1954年前后发现的一种粒子有关，它引出了一个不可思议的难解之谜。有一种按图2-5所示那样衰变成3个π介子的带电粒子。这种粒子有一阵子曾经被叫做τ介子。我们在图2-5中还看到另一种粒子，它衰变成2个介子；由电荷守恒可知，其中一个必定是电中性的。这种粒子叫做θ介子。这样，第一，我们有一种叫做τ介子的粒子，它衰变成3个π介子，还有一种叫做θ介子的粒子，它衰变成2个π介子。过了没多久就发现，τ介子和θ介子的质量几乎相等；事实上，在实验的误差范围内，它们是相等的。其次，人们发现，它们衰变成3个π介子和2个π介子所需要的时间间隔几乎完全相等，即它们具有相同的寿命。还有，无论什么时候产生这两种粒子，它们都会按相同的比例诞生，即14%的τ介子和86%的θ介子。

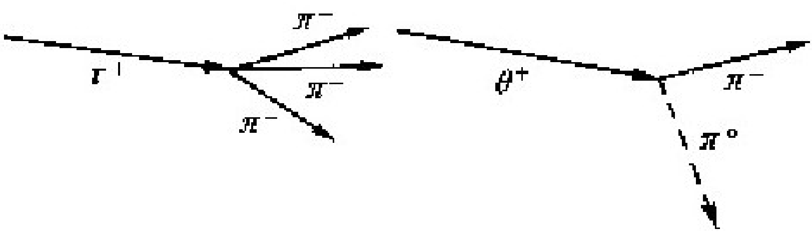


图2-5　τ＋和θ＋粒子衰变的示意图

任何大脑清晰的人立刻就会意识到，它们必定是同一种粒子，我们只是产生出了一种具有两种不同的衰变方式的粒子——不是两种不同的粒子。这种能够按两种不同方式衰变的粒子因此就具有相同的寿命和相同的产出比例（因为这就是衰变成这两种类型的机会之比）。

然而，利用量子力学中的反射对称原理可以证明（我们在这里完全无法解释如何证明），让这两种状态都来自同一种粒子是不可能的——同一种粒子不可能按这样两种方式衰变。与反射对称原理对应的守恒定律是没有经典类比的，于是，就把这种量子力学的守恒叫做宇称守恒。

因此，正是宇称守恒的结果，或者更精确地讲，由于在反射变换下弱衰变的量子力学方程的对称性，使得同一种粒子不可能衰变到两种状态，看来，这必定是质量、寿命等因素的某种巧合。但是，对这个现象研究得越深入，这种巧合就越显著，怀疑的看法逐渐地出现了，自然界的反射对称性这条深刻的定律可能是不正确的。

由于这种显而易见的失效，为了检验这个定律在别的情况下是否正确，物理学家李政道和杨振宁建议做一些与这个衰变有关的其他实验。第一个这样的实验由哥伦比亚大学的吴健雄女士做出来了，实验是这样做的：我们知道，钴有一种通过发射一个电子而衰变的同位素，它在极低温度下的极强磁场中具有磁性，如果温度足够低，以至热振动不会使原子的磁场抖动得太厉害，它们就会顺着磁场排列起来。因此，所有的钴原子就在这个强磁场中排成一行。随后，它们就要发射一个电子而衰变，实验发现，当原子排列在一个B矢量朝上的磁场中时，大部分电子向下方发射。

如果一个人并不是真正“熟悉”这个世界，上面所谈到的现象似乎没有任何意义，但是，如果我们懂得世界上的问题以及各种有趣的事情，那么就会看到，这是一项最引人注目的发现：当我们把钴原子放在一个极强的磁场中时，在衰变出来的电子中，向下运动的比向上运动的多。因此，如果我们在“镜像”中做一个相应的实验，在这个实验中钴原子会朝着相反的方向排成一行，那么，它们就会向上而不是向下发射电子；实验中显示出的行为是不对称的。磁铁长出了细小的绒毛！磁铁的南极就是这样一个磁极，它令0衰变中产生的电子倾向于远离它；这就在物理上把北极与南极区分开来了。

在这之后，人们做了许多其他实验：π衰变成μ和v；μ衰变成一个电子加上两个中微子；近年来做的Λ衰变成质子和π的实验；Σ粒子的衰变；以及许多其他的衰变实验。事实上，在几乎所有可预计的情形中，人们都发现，实验不遵从反射对称性！从根本上说，在物理学的这一个层次上，反射对称律并不适用。

简而言之，我们能够告诉火星人该把心脏放在哪一边，我们对他说，“听好了，你自己做一块磁铁，并把线圈套进去，再通上电流，然后取一些钴并把温度降低。把实验安排成这样，使得电子从脚部向头部运动，这样，电流通过线圈运动的方向就是这样一个方向，从我们所说的右边流入而从左边流出。”因此，现在通过做一个这种类型的实验就有可能确定左和右了。

人们还预言过许多其他的特性。比如说，实验结果表明，钴核的自旋，即角动量在衰变前是5个h单位，而在衰变后是4个单位。电子带有自旋角动量，衰变还产生一个中微子。从这里很容易看出，电子必定带有指向其运动方向的自旋角动量，中微子也一样。因此，看起来电子好像是左旋的，而这也得到了证实。事实上，电子大都向左旋转这个结论就是在加州理工学院这里由玻姆（Boehm）和韦帕斯特拉（WaPstra）

证实的。（还有另外一些实验给出了相反的答案，但是那些实验都做错了！）

下一个问题自然就是要找出宇称守恒失效的规律。有什么规则使我们知道这种失效的程度有多大呢？这条规则是，失效只在那些非常慢的，叫做弱衰变的相互作用中发生，而当这种情况出现时，这条规则表明，像电子、中微子这样具有自旋的粒子倾向于按左旋的状态被发射出来。这是一条带有倾向性的规则；它把速度这个极矢量和角动量这个轴矢量联系起来，并且认为角动量方向逆着速度方向的可能性比顺着速度方向的可能性大。

好了，这条规则就是这样了，不过，如今我们并没有真的弄明白这条规则的来由。为什么这条规则是正确的，它的基本因由是什么，还有，它如何与别的事情联系起来？对上述事件是非对称的这个事实，我们感到如此震撼，以至于此刻还未能从这种震撼中充分恢复过来，去理解这个规则对其他所有的规则有何意义。然而，这个问题是引人入胜的，是新颖的、仍未解决的，因此，讨论与之相关的一些问题看来是合适的。

2-8　反物质

当其中一种对称性失效时，首先要做的事情就是立刻回过头去查一下已知的或者想当然的对称性清单，看看是否还会失去任何别的对称性。在我们的这张清单上，有一种操作还没有提到，这就是物质与反物质之间的关系，它也必须受到质疑。狄拉克曾经预言，除了电子之外，一定还有另外一种叫做正电子的粒子，它必然与电子有关（由安德森在加州理工学院发现）。这两种粒子的所有性质服从确切的对应规则：能量相等；质量相等；电荷反号；不过，有一条规则比任何别的规则都重要，这就是，当一对这样的粒子凑在一起时，就会相互湮没，并把它们的全部质量以能量的形式（比如说γ射线）释放出来。正电子是电子的一种反粒子，这些就是粒子和它的反粒子的特性。由狄拉克的论据清楚地知道，宇宙中所有别的粒子也应该有对应的反粒子。比如说，对应于质子应该有一个反质子，用P标记这个粒子。P应该带有负电荷，而且，质量与一个质子的质量相同，如此等等。然而，最重要的性质是，一个质子和一个反质子凑在一起时会相互湮没。我们强调这一点的理由是，当我们说存在一个中子，还存在一个反中子这句话时，人们并不理解是什么意思，因为他们会说，“一个中子是中性的，这样，它怎么可能带有相反的电荷呢？”在这里，“反”字体现的规则并非只是指它带有相反的电荷，而是指它具有一组性质，这组性质全部相反。反中子与中子是按照这样的方式被区别开来的：如果我们把两个中子放在一起，它们只是作为两个中子而存在，可是，如果我们把一个中子和一个反中子放在一起，它们就会相互湮没，形成巨大的爆炸而释放出能量，发射出各种π介子、γ射线以及各种稀奇古怪的粒子。

好，假如我们有了反中子、反质子和正电子，原则上就能够造出反原子。它们还未被造出来，但原则上是可能的。例如，一个氢原子在中心处有一个质子，一个电子在外围旋转。现在设想我们在某个地方能够造出一个反质子，让正电子绕着它旋转，它会绕着转吗？唔，首先，反质子带负电，而正电子带正电，因此，它们按对应的方式相互吸引——正反粒子质量完全相等；所有事情都相同。这是物理学中的对称性原理之一，物理方程似乎显示，假如一方面有一个时钟，比如说，用物质做成，另一方面我们造一个相同的反物质时钟，那么，它就应该按上面所说的对应方式运转（当然，如果我们把两个时钟放在一起，它们就会相互湮没，但这是另一回事了）。

这一来就出现了一个问题。我们能够用物质做两个时钟，一个是“左旋的”，一个是“右旋的”。比如说，我们可以做这样一个时钟，它不是用简单的方法做的，而是用钴和磁铁以及电子探测器做成，这个探测器是用来探测β衰变电子的存在并对其进行计数的。每数到一个电子，秒针就跳一格。于是，镜像时钟由于接收到较少电子，就不会以相同的速率走动。因此，我们显然能够做出两个时钟，使左旋钟与右旋钟快慢不同。让我们用物质来做一个时钟吧，把这个钟叫做标准钟或者右旋钟。然后，让我们还是用物质来做一个左旋钟吧。我们刚才就已经发现，一般来说，这两个时钟将不会走得一样快；在上述那个著名的物理现象发现之前，人们曾经认为它们应该走得一样快。人们还假定，物质与反物质是等效的。那就是说，如果我们做一个形状一样的右旋反物质时钟，那么，它就会与右旋的物质时钟走得一样快，而如果我们做出一样的左旋时钟，它们也应该走得一样快。换句话说，原先人们相信所有这四种时钟全都走得一样快；现在我们当然知道，右旋物质和左旋物质是不一样的。因此，这样推测起来，右旋的反物质与左旋的反物质也是不一样的。

因此，显而易见的问题就是，如果存在配对的话，究竟哪一个对哪一个呢？换句话说，右旋物质的行为举止与右旋反物质的一样吗？或者说，右旋物质的行为举止与左旋反物质的一样吗？使用正电子衰变代替电子衰变的β衰变实验显示，这种相互关联是：“右旋”物质的行为与“左旋”反物质的行为一模一样。

因此，总算得出结论了，左右对称性确实依旧维持下来！如果我们做了一个左旋时钟，只是用另一种类物质来做，即反物质而不是物质，那么，它就会走得一样快。因此，所得出的结论就是，出现在我们的对称性列表中的，不再是两条独立的规则，而是这两条规则合并起来变成一条新的规则，这条规则说，右旋物质与左旋反物质是对称的。

因此，如果我们的火星人朋友是由反物质构成的，而我们又指示他构造像我们这样的“右旋”模型，当然就会得出相反结果了。在经过了多次你来我往的交谈之后，我们彼此教会对方建造宇宙飞船，并且双方在宇宙空间的中途相会，这时，会发生什么事情呢？我们已经相互向对方传授过自己的习惯以及其他别的知识了，并且双方都迫不及待地相互握

手。好了，如果他伸出左手，千万要当心！

2-9　不完整的对称性

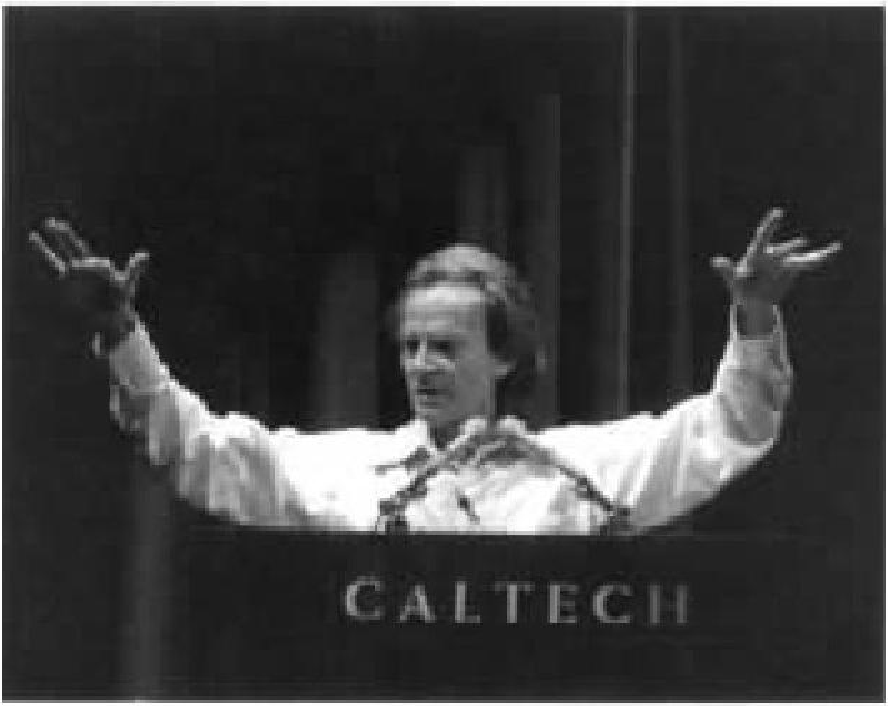
下一个问题是，我们该如何去理解那些接近于对称的定律呢？有关这个问题，令人惊讶的是，一方面，在横跨物理学各个领域，包括强相互作用现象——核力、电相互作用现象，甚至像万有引力这样的弱的相互作用等重要的领域内，有关这些现象的所有的定律似乎都是对称的。另一方面，这个小小的额外的例子却认为，“不是的，物理定律并不是对称的！”大自然是几乎对称的，但又不是完全对称的，这究竟是怎么一回事？我们该怎样理解这一点？首先要问，我们还有任何别的例子吗？答案是，事实上我们确实有一些别的例子。比如说，在质子与质子之间、在中子与中子之间，以及在中子与质子之间，相互作用力的核力部分是完全相同的——核力具有一种对称性，一种新的对称性，它使我们能够交换中子和质子——可是，这种对称性显然不是一种普遍成立的对称性，原因就是，在两个相隔一段距离的质子之间的静电排斥力对中子而言并不存在。因此，我们总是能够用一个中子代替一个质子这个断言并不是普遍成立的，它只不过是一个好的近似。为什么说是好的近似呢？因为核力比静电力强得多。因此，这也是一个“接近于”对称的情形。这样看来，我们在别的事情上确实也有一些例子。

在人类的心智中有一种倾向，认为对称性是某种完美的象征。事实上，这与希腊人的古老的观念一样，认为圆是完美的，如果相信行星的轨道不是圆形，而只是接近于圆形，这就太可怕了。圆周轨道与近圆周轨道之间的差别并不是一种小小的差别，就人类的心智而言，这是一个根本性的改变。在圆形中存在着完美性和对称性的一个标志，一旦出现微小的偏离，就什么也没有了——这种偏离是完美性和对称性的终结——它不再是对称的了。于是，问题就在于，为什么行星的轨道只是接近于一个圆呢——这是一个困难得多的问题。一般来说，行星的实际运动轨道应该是椭圆，但是，随着时间的流逝，由于潮汐力等因素的作用，轨道就变得接近于对称了。接下来的问题是，我们在这里是否存在着一个类似的问题呢。从圆形的观点来看，这个问题就是，假如行星的轨道是精确的圆形，那么，情况显然是很简单的，也就无须做什么解释。可是，由于它们只是近似的圆形，就需要做很多解释，结果表明，这是一个很大的动力学问题，而我们现在的问题就是，通过考虑潮汐力等因素来解释它们为什么是近似对称的。

这样看来，我们的问题就是要解释对称性的由来。为什么大自然如此接近对称呢？没有人知道其所以然。我们可能想到的惟一的解释大概是这样的：在日本有一座大门，一座建于内冈市（Neiko）的大门，日本人有时认为它是全日本最美丽的大门；它是在深受中国艺术强烈影响的时期建成的。这座大门做得非常精巧，上面有许多山形墙和美丽的雕刻，还有许多柱子以及刻有龙头和帝王图案的门柱，如此等等。可是，当人们挨近去看时，就会看到，在其中一根门柱上，在精巧而复杂的图

案中，有一个小小的图案是颠倒过来刻的；要是没有这个图案，事情就是完全对称的了。如果你要问为什么会这样，传说中说，把它颠倒过来刻，为的是使天神不至于嫉妒人类的完美。因此，他们故意在那里留下一个错误，这样，天神就不会因为嫉妒而迁怒于人类了。

我们宁愿把这种看法倒过来，认为大自然之所以接近于对称，其真正的解释是：上帝把物理定律造得只是接近于对称，这样，我们就不至于嫉妒他的完美了！



第三章　狭义相对论

3-1　相对性原理

200多年以来，人们相信，由牛顿阐明的运动方程正确地描述了大自然，而第一次在这些定律中发现一个错误时，纠正这个错误的方法也就被找到了。这个错误及其纠正都由爱因斯坦于1905年发现。

我们曾经用以下方程来表述牛顿第二定律

F＝d（mv）/di，

这个表述含有一个不言而喻的假设，即m是一个常数，但是，我们现在知道这并不正确，物体的质量随速度的增加而增加。在经爱因斯坦修正过的公式中，m具有如下的表示形式

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \tag{3.1}$$

其中“静质量”m_0表示一个不运动的物体的质量，而c是光速，大约等于3×10^5千米/秒，或者大约186000英里/秒（1英里约为1.609千米）。

对于那些只是为了解决问题的人来说，以上就是相对论的全部知识了——它只是通过引入一个质量修正因子对牛顿定律做了修正。从公式本身容易看出，在一般情况下，这个质量的增加是非常小的。如果速度大到像环绕地球运行的人造卫星那么高，即5英里/秒，那么v/c＝5/186000：把这个数值代入公式中就看到，对质量的修正只等于二三十亿分之一，这个修正几乎不可能观测到。实际上，通过对多种粒子的观察，公式的正确性得到充分的证实，在这些粒子中，速度最高的几乎等于光速。然而，由于这种效应通常是如此之小，因此，它在理论上先于在实验上被发现看来是值得注意的。根据经验判断，在足够高的速度下，这种效应是非常大的，但是，它并不是用这种方法发现的。因此，了解一下一条涉及如此细微的修正的定律在首次被发现时，如何通过实验和物理上的推理方法的结合而被揭示出来是引人入胜的。许多人对这个发现做出了贡献，这些工作的最终成果就是爱因斯坦的发现。

实际上，爱因斯坦的相对论包括两个部分。这一章讲述狭义相对论，这个理论可以追溯到1905年。1915年，爱因斯坦发表了另一个理论，叫做广义相对论。这后一个理论研究狭义相对论到万有引力定律问题的扩展；我们在这里不会讨论广义相对论。

相对性原理最先由牛顿在他的运动定律的其中一个推论中陈述过："在一个给定的空间中，各个物体的运动是彼此相同的，无论这个空间是静止的，还是做匀速直线运动。"这就意味着，比如说，如果一艘宇宙飞船正在匀速漫游，那么，在宇宙飞船中做的所有实验以及其中的所有现象，将与当飞船没有运动时所看到的一模一样，当然啦，要假定实验者不朝外张望。这就是相对性原理的意义。这是一个极其简单的观念，仅有的问题是，对于在一个运动系统中做的所有实验来说，物理定律看起来与假定该系统静止时的样子相同，这个断言是否正确？让我们先来研究一下牛顿定律在运动系统中是否一模一样。

假设莫正以匀速v朝x方向运动并测量某个点的位置，如图3-1所示。他在自己的坐标系中把这个点的"x坐标"记为x'。乔静止不动，并且测量同一个点的位置，在自己的坐标系中把他的"x坐标"记为x。两个坐标系中的坐标之间的关系从图中清楚可见。经过时间i之后，莫的坐标原点移过了一段距离ut，如果开始时两个坐标系重合，那么

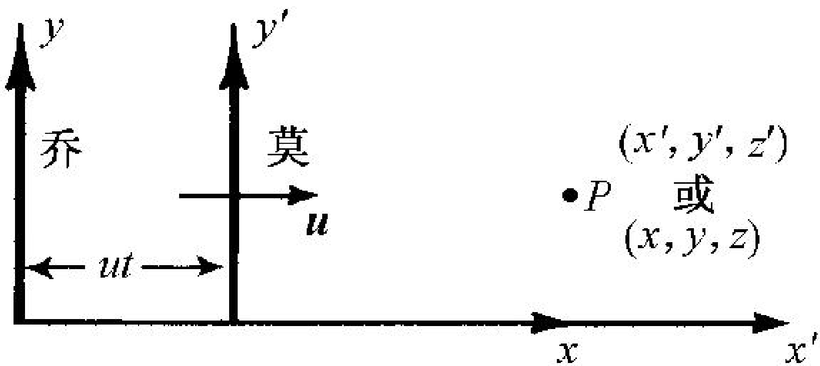


图3-1　沿着x轴做匀速相对运动的两个坐标系

$$
\begin{aligned}
x' &= x - ut,\\
y' &= y,\\
z' &= z,\\
t' &= t.
\end{aligned}
\qquad (3.2)
$$

如果我们把这个坐标变换代入牛顿定律中，就会发现，当这些定律被变换到带撇的坐标系中时，形式是一模一样的；也就是说，牛顿定律在一个运动的坐标系中与在一个静止的坐标系中形式相同，因此，通过力学实验不可能得知系统是否在运动。

长期以来，相对性原理被用于力学问题中。它被各种不同的人，特别是惠更斯，用来求出台球的碰撞规则，其方法与我们在第10章[7]中用来讨论动量守恒的方法极其相似。在19世纪，由于研究工作进入了电、磁和光现象的领域，对这条原理的兴趣加深了。许多人对这些现象进行了大量细心的研究，其中麦克斯韦的电磁场方程组达到了顶峰，它用统

一的方法描述了电、磁和光的现象。然而，麦克斯韦方程组似乎不遵从相对性原理。这就是说，如果我们把方程（3.2）代入麦克斯韦方程组进行变换，那么，它们的形式并不保持不变；因此，在一艘运动着的宇宙飞船上，电学的和光学的现象应该不同于一艘静止的飞船上的现象。这样，人们就可以利用这些光学现象来确定飞船的速度；尤其是可以通过实施适当的光学的或电学的测量来确定飞船的绝对速度。麦克斯韦方程组的推论之一是，如果在场中出现扰动而发出光，那么，这些电磁波就会向四面八方均匀地以相同的速度c，即186000英里/秒（1英里约为1.609千米）传播。方程组的另一个推论是，如果扰动的源头在运动，发射出来的光则以相同的速度c穿越太空。这类似于声音的传播，声波的速度同样不依赖于波源的运动状态。

在光波的情况下，这种与波源的运动状态无关的特性，引出了一个引人入胜的问题：

设想我们坐在一辆以速度u行驶的汽车上，从后方发出的光波以速度c越过汽车传播。对（3.2）式求一次导数得到

$$dx'/di = dx/di - u,$$

这就意味着，根据伽利略变换，我们在汽车中测得的越过光波的表观速度就不会是c而应该是c-u。举例来说，如果汽车以100000英里/秒行驶，而光则以186000英里/秒传播，那么，表观上看，越过汽车的光波应该以86000英里/秒传播。总之，通过测量越过汽车的光波的速度（如果伽利略变换对光波而言正确的话），人们就应该能够确定汽车的速度。在这种一般想法的基础上，人们做了大量的实验以确定地球的速度，但是，这些实验全都失败了——它们根本没有给出什么速度来。为了确切地说明人们做了什么，以及问题到底出在哪里，我们将详细地讨论其中的一个实验；当然，确实是出了点什么问题，在物理方程中存在着某些错误。到底是怎么一回事呢？

3-2　洛伦兹变换

当物理方程在上述情形中失效的问题被揭示出来时，人们首先想到的是，麻烦一定出在电动力学的新的麦克斯韦方程组上，这组方程当时只有20年的历史。这些方程看起来几乎明显地一定是错的，因此，要做的事情就是这样改变它们，使得在伽利略变换下相对性原理得到满足。当人们试图这样做的时候，那些必须被引入到方程组中去的新的项预言了新的电学现象，当人们从实验上检验这些预言时，这些现象根本就不存在，因此，这种尝试不得不被放弃。后来，事情逐渐地变得明朗了，电动力学的麦克斯韦定律是正确的，出现的麻烦必须在别的地方寻找。

在这个期间，洛伦兹在麦克斯韦方程组中实施下面的变换时注意到了一件不寻常的奇怪的事情：

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}},$$
$$y' = y,$$
$$z' = z, \quad (3.3)$$
$$t' = \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}},$$

当把这个变换应用到麦克斯韦方程组的时候，方程组保持形式不变！公式（3.3）就是著名的洛伦兹变换。接着，爱因斯坦仿效原先彭加勒的一个提议，建议所有的物理定律都应该在洛伦兹变换下保持不变。换句话说，我们应该改变的，不是电动力学的定律，而是力学的定律。我们应该如何改变牛顿定律，使它们在洛伦兹变换下保持不变呢？如果这个目标确定下来了，我们就必须以这样一种方式改写牛顿的方程组，使我们提出的条件得到满足。结果发现，惟一的要求就是，在牛顿方程组中的质量m必须用公式（3.1）给出的形式替换。当做了这种改变之后，牛顿定律和电动力学定律就会相互协调。于是，如果我们在比较莫与乔的测量时使用洛伦兹变换，就根本不可能搞清楚究竟哪一个人在运动，原因就是，在两个坐标系中，所有方程的形式都将是相同的！

用坐标与时间之间的新变换代替旧变换到底有什么意义，讨论一下这个问题是颇为有趣的，因为旧的（伽利略）变换似乎是不言而喻的，而新的（洛伦兹）变换看起来是特殊的。我们想知道，是新的而不是旧的变换正确，这在逻辑上和实验上是否可能。为了找出问题的答案，研究力学定律是不够的，而是应该像爱因斯坦所做的那样，还必须分析我们关于空间和时间的观念，以便理解这个变换。我们将不得不相当详尽地讨论这些观念以及它们在力学上的含意，因此，我们先交待一下，因为结论与实验是一致的，所以这种努力是有理由的。

3-3　迈克尔孙-莫雷实验

正如上面所提到的，人们多次尝试确定地球通过假想的“以太”运动时的绝对速度，这种“以太”被想象成充满整个空间。在这些实验中，最著名的是迈克尔孙和莫雷在1887年所做的一个实验。18年之后，该实验的否定的结果才最终由爱因斯坦做出了解释。

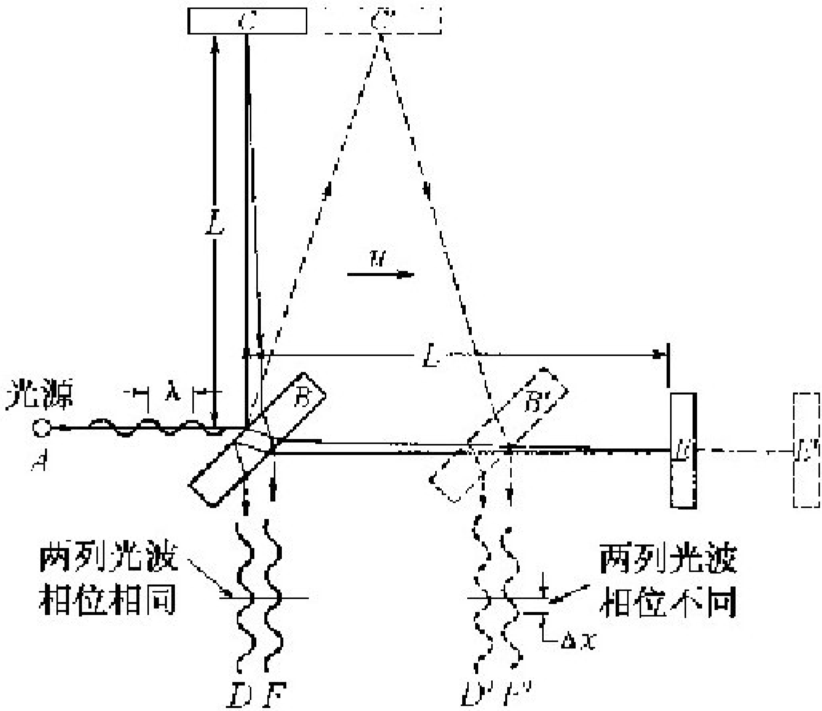


图3-2　迈克尔孙莫雷实验示意图

迈克尔孙莫雷实验使用一台如图3-2所示的仪器进行。这台仪器基本上由一个光源A、一块部分镀银的玻璃板B和两块镜子C和E组成，所有部件都安装在一块坚固的底座上。两块镜子被安装在与B等距离L的位置。玻璃板B将入射的光束分开成两束，而这两束被分开的光束在相互垂直的方向继续射向两面镜子，在那里，它们被反射回B处。在返回到B时，这两束光作为叠加光束D和F重新结合起来。假如光从B传播到E的来回时间与从B传播到C的来回时间相等，那么，出来的光束D和F的相位就会相同，而光强就会相互加强，但是，如果这两个时间稍微不同，这两束光就会有微小的相位差，结果就会产生干涉现象。如果这台仪器“静止”在以太中，那么，这两个时间就应该正好相等，但是，如果仪器以速度u朝右方运动，这两个时间就会存在差异。让我们看一看为什么会这样。

我们先计算光从B传播到E并返回所需要的时间。令光从玻璃板B传播到镜子E的时间是t_1，而返回的时间是t_2。现在，在光从B传播到镜子这段时间内，仪器运动了一段距离ut_1，因此，光波必须以速度c穿越一段距离$L+ut_1$。我们也可以用ct_1表示这段距离，由此得到

$$ct_1=L+ut_1，\text{或者}\quad t_1=L/（c-u）.$$

（从光波相对于仪器的速度是c-u这个观点来看，上述结果也是明显

的，因此，时间就是长度L被c-u除。）用类似的方法可以计算时间t_2。在这段时间内，玻璃板B前进了一段距离ut_2，因此，光波的回程距离是$L-ut_2$。于是得到

$$ct_2=L-ut_2，\text{或者}\quad t_2=L/(c+u).$$

结果，总的时间就是

$$t_1+t_2=2Lc/(c^2-u^2).$$

为了便于今后对时间做比较，我们将这个式子写成

$$t_1+t_2=\frac{2L/c}{1-u^2/c^2} \tag{3.4}$$

第二个计算是光波从B传播到镜子C的时间t_3。与前面一样，在t_3时间内，镜子C向右运动了一段距离ut_3到达位置C'；与此同时，光波沿着一个直角三角形的斜边传播了一段距离ct_3，这个距离是BC'。对于这个直角三角形我们有

$$(ct_3)^2=L^2+(ut_3)^2$$

或者

$$L^2=c^2t_3{}^2-u^2t_3{}^2=(c^2-u^2)t_3{}^2,$$

由此得到

$$t_3=L/\sqrt{c^2-u^2}.$$

对于从C'返回的路程，从示意图的对称性可以看出，距离是一样的；因此，回程的时间也是一样的，而总的时间是$2t_3$。稍微将公式的形式重新整理一下就能够写出

$$2t_3=\frac{2L}{\sqrt{c^2-u^2}}=\frac{2L/c}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \quad (3.5)$$

我们现在能够比较两束光所耗费的时间了。表达式（3.4）和（3.5）的分子是相等的，它们表示假定仪器不动时要花费的时间。在分母中，除非u的大小与c差不多，否则u^2/c^2项将会很小。分母表示由仪器的运动引起的时间上的修正。看到了吧，这些修正并不相等——尽管两块镜子到B是等距离的，传播到C并返回的时间也要比传播到E并返回的时间稍微短一些，而我们必须要做的就是要精确地测量这个差别。

这里出现了一个不太重要的技术性的问题——假设两段长度L不精确地相等会怎样？事实上，我们肯定不能使它们完全相等。在这种情况下，我们只要将仪器转过90°，使BC沿着运动的方向而BE垂直于运动的方向就行了。这样，长度上任何微小的差异就变得不重要了，而我们要寻找的就是，当我们转动仪器时干涉条纹的移动。

在进行实验时，迈克尔孙和莫雷将仪器放置得使BE线（在白天和夜晚的某些时候）几乎平行于地球在其轨道上运动的方向。这个轨道速度大约是每秒18英里（1英里约为1.609千米），而在白天或者夜晚的某个时刻以及在一年之中的某段时间，任何“以太漂移”都应该至少是这个数值。这台仪器的灵敏度足以观测到这种效应，但是，并没有观察到任何时间上的差异——地球通过以太的速度没能被探测到。实验的结果是零。

迈克尔孙莫雷实验的结果令人极其费解和不安。寻求一个绝地逢生的方法的第一个富有成效的观念由洛伦兹提出。他指出，当物体运动时会收缩，收缩只是在运动的方向上发生。他还提出，如果一个物体静止时的长度是L_0，那么，当它以速度u平行于其长度方向运动时，新的长度由下式给出

$$L_{\parallel}=L_0\sqrt{1-u^2/c^2}. \quad (3.6)$$

我们把这个长度叫做L‖（L平行）。当把这个修正用到迈克尔孙莫雷干涉仪时，从B到C的距离不改变，但是，从B到E的距离缩短到L/1-u^2/c^2。因此，公式（3.5）不变，但是，公式（3.4）中的L就必须按照公式（3.6）而改变。当做了这些改变后，我们就得到

$$t_1+t_2=\frac{(2L/c)\sqrt{1-u^2/c^2}}{1-u^2/c^2}=\frac{2L/c}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \quad (3.7)$$

把这个结果与公式（3.5）做比较，我们就看到$t_1+t_2=2t_3$。因此，如果仪器以刚才描述的方式收缩，我们就能够理解，为什么迈克尔孙莫雷实验根本没有给出任何效应。虽然收缩假设成功地解释了实验的否定

结果，但却遭到人们的非议，认为它只是专门为了把困难解释过去而发明出来的，而且太不自然了。然而，在寻找以太风的许多其他实验中，出现了类似的困难，直到最后才发现，这似乎是大自然阻挠人类的“阴谋”，它通过引入某些新的现象来破坏它认为有可能测出u的各种现象。

人们最终认识到，正如彭加勒指出的那样，整个阴谋本身就是大自然的一条定律！彭加勒接着提出，存在这样一条自然定律，即不可能通过任何实验找到以太风；也就是说，不可能确定绝对速度。

3-4 时间的变换

在检验收缩的观念是否与其他实验中的事实协调一致时，人们发现，只要按照方程组（3.3）的第四个公式把时间也修正一下，一切就正确无误了。这是因为，从B传播到C并返回的时间t_3，在运动的宇宙飞船中进行实验的人算出的结果，与一个注视着宇宙飞船的静止观察者算出的并不相等。对于宇宙飞船上的人来说，这段时间就是2L/c，但是，对于另一个观察者来说，这段时间就是$(2L/c)/\sqrt{1-u^2/c^2}$[（3.5）式]。换句话说，当外部观测者看见宇宙飞船中的人点着一支烟时，所有的动作似乎都比正常情况慢，而对于飞船上的人，每件事情都以正常的速率变动。这样看来，不仅长度需要缩短，而且计时工具（“时钟”）显然也必须变慢。也就是说，在宇宙飞船上的人看来，当飞船上的时钟走过1秒时，对外面的人来说，它表示过了$1/\sqrt{1-u^2/c^2}$秒时钟在一个运动的坐标系中减慢是一种非常奇特的现象，因而需要做一番解释。为了理解这种现象，我们必须看一看时钟内部的机件，并且注意它运动时有什么事情发生。由于这件工作相当困难，我们将用一种非常简单的时钟。我们选择的是一种相当笨的时钟，但是原则上它是能够工作的：它是一把两端各有一面镜子的尺子（米尺），当我们在镜子之间发送一个光信号时，光波不间断地往返传播，每当光波向下传播时，它就滴答响一声，就像一个滴答作响的标准时钟那样。我们做两个这样的时钟，它们的长度完全相同，并且一起启动使它们同步；于是，由于它们的长度相同，而光波又总是以速度c传播，因此，从那时起它们就总是走得一模一样。我们把其中一个时钟让一个人带上他的宇宙飞船，他将尺子放置成垂直于飞船的运动方向；这样，尺子的长度就不会改变。我们怎样知道垂直方向的长度不变呢？双方的观察者可以约定，当他们擦肩而过时彼此在对方的y方向米尺上做上标记。由对称性可知，两个标记一定在相同的y坐标和y'坐标上，否则的话，当他们聚在一起比较结果的时候，一个标记就会比另一个高或者低，而我们就可以这样来区分谁真的在运动。

现在，让我们来看一看运动的时钟发生了什么事情。在宇航员把它带上飞船之前，他同意这是一只准确的、标准的时钟，而当他坐在飞船上往前飞时，他看不到任何特殊的事情。如果他看到了，他就会意识到他在运动——如果有什么事情由于运动而改头换面，他就会知道他在运动。但是，相对性原理认为，在一个匀速运动的坐标系中这是不可能的，因此，不会产生任何改变。另一方面，当外部观察者看着从旁边经

过的时钟时，他就会看到在两块镜子之间来回传播的光“真的”走着一条之字形的路径，因为尺子始终做横向运动。我们已经在有关迈克尔孙莫雷实验的问题中分析过这样一条之字形的运动了。如果在一个确定的时间内尺子向前运动了一段正比于u的距离，如图3-3所示，光在相同的时间内走过的距离正比于c，那么，垂直距离就会因此而正比于$1-u^2/c^2$。

这就是说，光在运动的时钟内来回传播比在静止的时钟内花费更长的时间。因此，运动的时钟内滴答声之间的表观时间就较长，延长的比例与图中所示的直角三角形的斜边（这就是在我们的公式中那个开平方根式的来由）的比例相同。从图中也可以明显地看出，u越大，运动的时钟看起来就走得越慢。不仅这种特别的时钟走得更慢，而且，假如相对论是正确无误的，那么，任何其他的时钟，无论根据什么原理工作，看起来也会走得更慢，并且变慢的比例是一样的——我们无须做进一步的分析就能够这样说。为什么会这样呢？

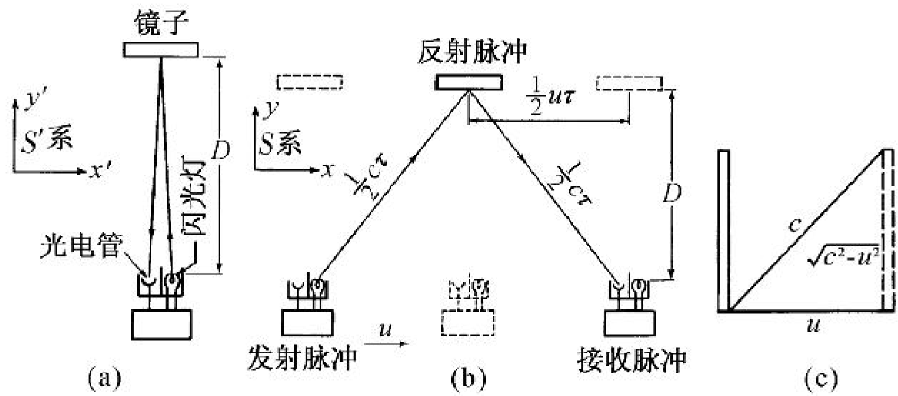


图3-3 （a）一个静止于S'系中的“光钟”；（b）相对于S系运动的同样的时钟；（c）在一个运动的“光钟”内的光束所走的斜向路径示意图

为了回答上面的问题，设想我们另外有两个做得一模一样的时钟，它们或者用齿轮等部件，或者以放射性衰变为原理，或者用别的什么东西做成。接着，我们将这两个时钟校准，使它们与原先那种时钟严格同步。当光波在原先的两个时钟内来回传播并以一声滴答声显示它的到达时，两个新式的时钟也完成了某种循环，这种循环通过连续两次发生在同一地点的闪光、叮当声或者其他信号被同时显示出来。其中的一个这种时钟连同第一种时钟一起被带上宇宙飞船。也许这个时钟并不会走得慢一些，而是会继续与那个静止的同样的时钟保持同步，因而与另一个运动的时钟不一致。啊，不会这样的，假如真的发生这种事情，飞船中的人就可以利用他的两个时钟之间的这种不一致来确定他的飞船的速度，而我们一直都在假定，这是不可能的。我们并不需要了解导致新型时钟产生这种效应的任何机理——我们只是知道，不管什么原因，它看起来都将会像第一个时钟那样走得慢。

好，如果所有的运动时钟都走得比较慢，如果测量时间的任何方法都给出较慢的时间进程，那么，我们就只好说，从某种意义上说，在一

艘宇宙飞船上，时间本身看来就比较慢。在那里的所有现象——人体的脉搏率，他的思维过程，他点燃一支烟的时间，他成长和衰老的进程——所有这些事情必定以同样的比例慢下来，原因就是他无法知道自己在运动。生物学家和医生有时候会说，在一艘宇宙飞船上，癌症扩散所需要的时间不一定会更长，但是，从一个现代物理学家的观点看，这几乎是确凿无疑的；否则，人们就可以利用癌症扩散的速率来确定飞船的速度！

时间随着运动变慢的一个非常有趣的例子与μ介子（μ子）有关，这是一种平均寿命为2.2×10^{-6}秒的自发衰变粒子。它们随宇宙射线一起到达地球，也可以在实验室中由人工产生出来。其中有些粒子在半空中就衰变掉了，但是，剩余的只有在与物体碰撞而停下来之后才衰变。显然，即使μ子以光速运动，在其短暂的一生中走过的路程也不会超出600米。不过，虽然μ子是在约10千米高的大气层顶部产生的，但是，在大气层下面的实验室中，人们在宇宙射线中确实找到了它们。这怎么可能呢？答案是，各种μ子以不同的速率运动，其中有一些非常接近光速。虽然在它们自身看来它们只生存了大约2微秒，但是，在我们看来它们生存了长得多的时间——长得足以令它们可以到达地面。时间增加的因子已知是$1/\sqrt{1-u^2/c^2}$。各种速度的μ子的平均寿命已经被相当精确地测量过了，所得到的结果与上述公式严格一致。

我们并不知道μ子为何会衰变，或者它的内部机理是什么，不过，我们确实知道，它的行为符合相对性原理。这就是相对性原理的效用——它允许我们甚至对那些我们在其他方面知之不多的事情做出预言。比如说，在我们对引起介子衰变的原因获得一些概念之前，还是能够预言，当它以/倍光速的速度运动时，它所能生存的表观时间长度是$(2.2\times10^{-6})/\sqrt{1-u^2/c^2}$秒；我们的预言是有用的——这是有关这个问题的一件好事。

3-5　洛伦兹收缩

现在，让我们回到洛伦兹变换的（3.3）式，并尝试更好地理解坐标系（x,y，z,i）与（x'，y'，z'，i'）之间的关系，我们将这两个坐标系分别叫做S系和S'系，或者叫做乔和莫的坐标系。我们已经看到，第一个方程是以沿x方向收缩的洛伦兹假设为基础的；我们如何能够证明发生这种收缩呢？我们现在认识到，在迈克尔孙莫雷实验中，由于相对性原理，横向的光臂BC不会改变长度；但是实验的零结果要求两个时间必须相等。因此，为了使实验给出零结果，纵向的光臂BE看起来必须缩短一个因子$1-u^2/c^2$。根据乔和莫所做的测量，这种收缩是什么意思呢？假如随同S'系沿x方向运动的莫正在用一把米尺测量某个点的x'坐标。他用米尺量了x'次，这样，他就认为距离是x'米。

然而，在S系中的乔看来，莫正在使用一把被缩短了的尺子，因此，被测出的“真实”距离是$x'1-u^2/c^2$米。于是，如果S'系离开S系运动了

一段距离ui，那么，S系上的观察者就会说，在他的坐标系中测量时，同样那个点的距离是x＝x'1-u²/c²＋ut，或者

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}},$$

这就是洛伦兹变换的第一个方程。

3-6　同时性

与上述问题类似，由于时间标度的差异，在洛伦兹变换的第四个方程中也引入了这个分母的表达式。在这个方程式中，最有趣的一项是分子中的ux/c^2项，因为这是完全新的和未曾预料到的。那么，这一项有什么意义呢？如果我们细心留意一下这个情况，就会发现，由莫在S'中看，两个在不同地点同时发生的事件，由乔在S中看并不同时发生。如果一个事件在t_0时刻在x_1处发生，而另一个事件则在（相同的）t_0时刻在x_2处发生，那么，我们就会发现，两个对应的时刻t'_1和t'_2相差一个数值

$$t'_2 - t'_1 = \frac{u(x_1 - x_2)/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.$$

这种情况叫做“相隔一段距离的同时性的破坏”，为了把这个概念搞得更清楚一点，让我们考虑下面的实验。

设想一个在一艘宇宙飞船（S'系）中活动的人在飞船的两头各放置了一个时钟，并且有兴趣确定这两个时钟是否同步。怎样能够使两个时钟同步呢？有许多方法。一种几乎不需要多少计算的方法是，首先精确地定出两个时钟之间的中点。然后，从这个位置发送一个光信号，这个信号将以相同的速度向两个方向传播并且肯定会同时抵达两个时钟处。信号的这种同时抵达能够用来使时钟同步。让我们接着设想，在S'系中的人用这个特别的方法让他的时钟同步。让我们来看一看，在S系中的观察者是否会认为这两个时钟是同步的。在S'系中的人有理由相信它们是同步的，因为他不知道自己在运动。但是，在S系中的人却推论说，由于飞船向前运动，前面的时钟正在背离光信号，因此，光波为了要赶上它，必须走过大于一半的路程；然而，后面的时钟却迎着光信号向前传播，这段距离就比较短。因此，信号首先抵达后面的时钟，虽然在S'系中的人认为信号同时到达。我们由此看到，如果宇宙飞船中的人认为两个位置上的时间是同时的，那么，在他的坐标系中，两个相等的i'值必定对应于另一个坐标系中两个不同的i值！

3-7　四维矢量

让我们来看一看在洛伦兹变换中还能够发现些什么别的东西。在x项和i项之间的变换，形式上类似于我们在第一章中研究坐标系的旋转时考虑过的x项和y项的变换，注意到这一点是饶有趣味的。在那里我们有

$$\begin{aligned} x' &= x\cos\theta + y\sin\theta, \\ y' &= y\cos\theta - x\sin\theta, \end{aligned} \qquad (3.8)$$

其中新的x'把原来的x和y组合了起来，而新的y'也把原来的x和y组合了起来；与此相似，在洛伦兹变换中，我们看到了由x和t组合起来的新的x'，以及由t和x组合起来的新的t'。这样，洛伦兹变换就类似于一种旋转，只不过它是在空间和时间中的“旋转”，这似乎是一个奇怪的观念。这种与旋转的类比可以通过计算以下的量来核实

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2. \qquad (3.9)$$

在这个方程中，每一边的前三项在三维几何中表示一个点和原点之间的距离（一个球面）的平方，不管坐标系怎样旋转，它都保持不变（不变量）。同样，方程（3.9）表示，存在某种包括时间在内的组合，它在洛伦兹变换下并不改变。这样，与旋转的类比就完整了，而且，这种类比表明，矢量（也就是这样一些量，它们含有变换方式与坐标和时间的变换方式一样的“分量”）在相对论领域也是有用的。

因此，我们来尝试把矢量概念加以推广，使之包括时间分量，而到目前为止我们认为它只有空间分量。这就是说，我们认为应该存在有4个分量的矢量，其中3个与一个普通矢量的分量相似，而这些分量还将与第4个分量结合起来，这个分量是时间部分的类比。

这个概念将在后面几章中做进一步的分析，在那里我们会发现，如果将前一节的观点应用到动量上，那么，变换关系给出3个与普通动量分量一样的空间部分，以及一个第4分量，即时间部分，它就是能量。

3-8　相对论动力学

我们现在准备更一般地研究在洛伦兹变换下力学定律到底取什么形式。（迄今为止，我们已经解释过长度和时间如何变化，但是还没有讨论过怎样得到m的修正公式[公式（3.1）]。我们将在下一章中对此加以说明。）为了看一看爱因斯坦对牛顿力学中的m进行修正的重大意义，我们从力是动量的变化率这条牛顿定律开始，也就是

$$\boldsymbol{F} = \mathrm{d}(m\boldsymbol{v})/\mathrm{d}t.$$

动量还是用mv表示，但是，当我们使用新的m时，这个公式就变成

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \qquad (3.10)$$

这就是牛顿定律的爱因斯坦修正。在这种修正下，如果作用力和反作用力仍然相等（这并不一定指在每个时刻都如此，而是指最终结果相等），那么，就会和以前一样存在动量守恒，但是，得以保持不变的量并不是原来使用不变质量的mv，而是如公式（3.10）所表示的量，这个量使用经过修正的质量。在动量的公式中做了这个改变之后，动量守恒仍然有效。

现在，让我们来看一看，动量如何随着速度而改变。在牛顿力学中，动量正比于速度，并且，根据（3.10）式，在一个速度小于c的相当广的范围内，由于平方根式与1相差无几，因此，在相对论力学中动量随速度的变化关系几乎是一样的。但是，当v几乎等于c时，平方根式接近零，动量因此而趋向无限大。

假如一个不变的力作用到一个物体上很长一段时间，会发生什么事情呢？在牛顿力学中，物体持续不断地加速，最终运动得比光还要快。但是，这在相对论力学中是不可能的。在相对论中，物体持续不断地增加动量，而速度却不会这样，动量能够不断地增加是因为质量在增加。经过一段时间后，从速度改变这层意义上看，实际上并不存在加速度，但是动量却继续增加。当然，只要一个力使某个物体的速度产生很小的改变，我们就说这个物体具有很大的惯性，而这正好就是相对论质量公式所要表达的意思[参见公式（3.10）]——这个公式告诉我们，当v几乎与c一样大小时，惯性是非常大的。下面是这种效应的一个例子，在加州理工学院的同步加速器中，为了让高速电子偏转，我们需要非常强的磁场，它的强度比根据牛顿定律预期的要强2000倍。换句话说，同步加速器中的电子的质量是它们的正常质量的2000倍，就像一个质子的质量那么大！m应该是m_0的2000倍意味着$1-v_2/c_2$一定是1/4000000，这就意味着v_2/c_2与1相差1/4000000，或者v和c相差1/8000000，因此，电子的速度非常接近光速了。如果电子和光同时开始从这个同步加速器中产生并注入布里奇实验室[BridseLab，估计在700英尺（1英尺约为0.3048米）远处]，那么，谁会先到达呢？当然是光，因为光总是运动得更快。[8]提前多少时间呢？那太难说了——我们还是改为用光所超前的距离表示吧：大约是1/1000英寸（1英寸约为0.0254米），或者说一张纸厚度的1/4！当电子运动得这么快时，它们的质量是巨大的，但是，它们的速度不能超过光速。

现在，让我们来考察一下，质量的相对论修正的一些进一步的结果。考虑一个小容器中气体分子的运动。当气体被加热时，分子的速度就增加，因此质量也增加，从而气体就更重。在速度很小的情况下，可以利用二项式定理将$m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}=m_0(1-v^2/c^2)^{-1/2}$展开成幂级数，从而得到表示质

量增加的近似公式。展开的结果是

$$m_0(1-v^2/c^2)^{-1/2}=m_0\left(1+\frac{1}{2}v^2/c^2+\frac{3}{8}v^4/c^4+\cdots\right).$$

我们从这个公式中清楚地看到，当v很小的时候，级数迅速收敛，头两三项之后的各项可以忽略。于是可以写出

$$m\approx m_0+\frac{1}{2}m_0v^2\left(\frac{1}{c^2}\right). \qquad (3.11)$$

公式右边的第二项表示分子由于具有速度而引起的质量增加。当温度增加时，v^2成正比增加，这样，我们就可以说，质量的增加正比于温度的增加。但是，由于在原来的牛顿意义下$m_2v^2/2$是动能，因此，我们也可以说，全部气体的质量的增加等于动能的增加被c^2除，或者写成$\triangle m=\triangle(K.E.)/c^2$。

3-9 质量和能量的等效性

上述的观察引导爱因斯坦提出这样一个建议，如果我们设想，一个物体的质量等于它的总能量被c^2除，那么，物体的质量就能够表示得比公式（3.1）更简单。如果用c^2乘公式（3.11），结果就是

$$mc^2=m_0c^2+\frac{1}{2}m_0v^2+\cdots. \qquad (3.12)$$

在公式中，左边的项表示一个物体的总能量，右边最后一项就是普通的动能。爱因斯坦把那个很大的常数项m_0c^2解释成是该物体的总能量的一部分，它是一种叫做“静能”的固有能量。

让我们跟随爱因斯坦探究一下，物体的能量总是等于mc^2这个假设有些什么推论。作为一个有趣的结果，我们将导出质量随速度变化的公式（3.1），到目前为止，我们只是把这个公式当做假设来看待。我们从处于静止状态的物体开始，这时，它的能量是m_0c^2。接着，我们对这个物体施加一个力，这个力使物体开始运动并给予它动能；因此，由于能量增加了，质量也就增加了——这已经隐含在最初的假设中了。只要力继续作用，能量和质量两者就会不断地增加。我们已经看到（第13章9），能量对时间的变化率等于力乘以速度，也就是

$$\frac{dE}{dt}=\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{v}. \qquad (3.13)$$

我们还有（第9章[10]公式9.1）F＝d（mv）/dt。当这些关系与能量的定义结合起来时，公式（3.13）就变成

$$\frac{\mathrm{d}(mc^2)}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{v}\cdot\frac{\mathrm{d}(m\boldsymbol{v})}{\mathrm{d}t}. \qquad (3.14)$$

我们希望求解这个方程得到m。为了这样做，我们首先利用一个数学技巧，在方程的两边乘2m，把方程变成

$$c^2(2m)\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}=2mv\frac{\mathrm{d}(mv)}{\mathrm{d}t}. \qquad (3.15)$$

我们需要把导数除去，这可以通过对方程的两边做积分来实现。可以看到（2m）dm/di这个量是m^2的时间导数，而（2mv）·d（mv）/di则是$(mv)^2$的时间导数。因此，方程（3.15）等同于

$$c^2\frac{\mathrm{d}(m^2)}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(m^2v^2)}{\mathrm{d}t}. \qquad (3.16)$$

如果两个量的导数相等，这两个量本身最多相差一个常数，比如说C。这使我们能够写下

$$m^2c^2=m^2v^2+C. \qquad (3.17)$$

我们需要更明确地确定常数C。由于方程（3.17）必定对所有的速度都成立，因此我们可以选择v＝0这个特别的情形，并且认为这种情况下的质量就是m_0。把这些量代入方程（3.17）中就得出

$$m_0{}^2c^2=0+C.$$

现在可以把这个C值代入方程（3.17）中，方程变成

$$m^2c^2-m^2v^2+m_0{}^2c^2. \qquad (3.18)$$

用c^2除并重新整理各项就得出

$$m^2(1-v^2/c^2)=m_0{}^2,$$

由这个结果我们得到

$$m = m_c / \sqrt{1 - v^2 / c^2}. \quad (3.19)$$

这就是公式（3.1），正好就是为了使公式（3.12）中的质量与能量相一致所需要的。

通常，这些能量变化相当于质量上非常轻微的改变，原因就是，我们平时不可能从一定量的材料中产生许多能量；但是，以一个爆炸能量相当于2万吨级TNT的原子弹为例，可以证明，由于能量被释放出来，爆炸之后的残余物比反应材料的初始质量轻了1克，也就是说，根据关系式$\triangle E = \triangle mc^2$，被释放出来的能量具有1克的质量。利用物质湮没而完全转变成能量的实验，这个关于质量与能量的等效性的理论已经被完美地证实：一个电子和一个正电子在静止状态下被放在一起，每一个带有静质量m_0。当它们碰到一起时，就会蜕变成两束伽马射线，每一束射线具有精确的能量m_0c^2。这个实验提供了一个直接的方法，用来确定与一个粒子的静质量相联系的能量。



第四章　相对论性的能量和动量

4-1　相对论和哲学家

在这一章中，我们将继续讨论爱因斯坦和彭加勒的相对性原理，因为它影响着我们的物理观念和人类思想的方方面面。

彭加勒对相对性原理做过以下的表述：“根据相对性原理，对一个不动的观察者和一个相对于他做匀速平移运动的观察者来说，描述物理现象的规律必定是相同的，所以，我们没有，也不可能有任何方法判断我们是否参与了这样一种运动。”

当这种观念骤然降临到这个世界上时，在哲学家中引起了巨大的骚动，特别是那些“鸡尾酒会哲学家”，他们会说，“噢，这非常简单，爱因斯坦的理论认为，一切都是相对的！”事实上，数目多得令人吃惊的哲学家们，不仅是那些在鸡尾酒会上出没的哲学家（不过，为了不令他们难堪，我们就把他们叫做“鸡尾酒会哲学家”吧），都会宣称，“一切都是相对的，这是爱因斯坦的结论，它对我们的思想观念有深刻的影响。”除此之外，他们还说“现象依赖于参考系，这在物理学上已经得到证明”。这样的说法我们听得太多了，但是，却很难弄清楚它到底是什么意思。最初谈到的参考系也许就是我们在相对论的分析中用到的坐标系。这样，“事情依赖于人们的参考系”这个事实就被认为是对现代思想观念有过深刻的影响。人们可能很想知道这是为什么，因为事情依赖于某个人的观点这个想法毕竟是如此简单，因此，为了要发现它，肯定不需要物理学的相对论煞费苦心。某个人所看到的事情依赖于他的参考系，这个结论肯定是任何一个走在路上的人都知道的，因为，他首先从前面看见一个走近的行人，然后再看到他的背后；在据说是渊源于相对论的大多数哲学中，没有比“一个人从前面看和从背后看并不一样”这样一种说法更深刻的了。“盲人摸象”这个古老的故事也许是哲学家对相对论所持有的观点的另一个例子。

但是，在相对论中，必定存在比“一个人从前面看和从背后看并不一样”这样一种简单的说法更深刻的东西。相对论当然比这个要深刻得多，因为我们能够借助它做出明确的预言。如果仅仅从这样一个简单的观察事实就可以预知大自然的行为，那么，它肯定是相当不寻常的。

还有另外一派的哲学家，他们对相对论感到极度不安，相对论认为，如果不留意外面的某些东西，我们就不能够确定我们的绝对速度，而这些哲学家则认为，“一个人不留意外界的事物就不能确定他的速度，这是显而易见的。不借助外界而谈论一个物体的速度是毫无意义的，这也是不言而喻的；物理学家非常愚蠢，他们从前并不是这样想的，可是，他们现在总算弄明白了情况就是这样。只要我们哲学家认识到了物

理学家所遇到的问题是什么，我们立刻就会用大脑判断出，不留意外界的事物，就不可能判断一个人运动得有多快，并且就会对物理学做出巨大的贡献了。”这些哲学家总是伴随在我们左右，他们极力想要告诉我们一些事情，但是，他们从来没有真正地理解过这些问题的奥妙所在。

我们在洞察绝对运动时的无能为力是实验带来的一个结果，而不是朴素想法的结果，这一点我们很容易做出说明。牛顿本来就认为，假如一个人以均匀的速度沿着一条直线运动，他就不能判断自己运动得有多快。事实上，牛顿首先表述了相对性原理，而在前面一章中提到的引语就是牛顿的表述。那么，在牛顿的时代，哲学家们为什么根本就没有提出这种“一切都是相对的”，或者诸如此类的说法来喧哗一番呢？原因就是，直到麦克斯韦创立了电动力学理论之后，才有物理定律暗示，一个人可以不通过考察外界的事物就能测出自己的速度；实验上很快就发现这不可能做得到。

那么，一个人不留意外界就不能判断自己运动得有多快，这个结论是绝对的、明确的和在哲学上必然的吗？相对论的其中一个结果是一种哲学的发展，这种哲学认为，“你只能定义你能够度量的事物！因为，如果一个人没有看着他相对于什么去测量，就不能测出速度来，这是不言而喻的，因此，谈论绝对速度毫无意义就再清楚不过了。物理学家早就应该认识到，他们只能谈论他们能够测量的东西。”可是，整个问题在于：人们能否定义绝对速度，以及如果不考察外界，人们能否在实验中察觉自己是否在运动，这两个问题是一样的。换句话说，一件事物是否是可测量的，结论并不是仅仅通过思维而先验地得到的，而只能由实验做出决定。给定光的速度是186000英里/秒（1英里约为1.609千米）这样一个事实，人们就会发现，几乎没有任何哲学家会平静地宣称：如果光在一辆汽车内以186000英里/秒传播，而汽车又正以100000英里/秒行驶，那么，光也是以186000英里/秒越过地面上的观察者传播，这是不言而喻的。这对他们来讲是一个令人震惊的事实；恰恰就是这些宣称“这是显而易见的发现”的人，当你告诉他们一个特定的事实时，他们就会宣称这并不是显而易见的。

最后，甚至还有这样一种哲学，它认为，除非通过考察外界的事物，否则无法察觉任何运动。这在物理学上就完全不对了。是的，人们确实感觉不到在一条直线上的匀速运动，但是，假如整个房间在旋转着，我们肯定会知道的，因为每个人都会被抛向墙壁——会有各种各样的“离心”效应。比如说，利用一种叫做傅科摆的仪器，地球绕轴自转这种运动无须观察星星就能被探测到。因此“一切都是相对的”这个断言并不正确；只有均匀的速度不考察外界才无法察觉。绕着一根固定轴的匀速的转动就能够被察觉到。如果把这个结论告诉一位哲学家，他就会因不能理解而感到心烦意乱，因为对他来说，人们不需要通过考察外界的事物就应该能够确定绕着一根轴的转动这件事似乎是不可能的。如果这位哲学家足够老练，那么，过了一段时间之后，他就有可能回过神来并且说道，“我明白了。我们确实没有绝对转动这种玩意儿；你知道吗，我们其实是在相对于星星旋转。因此，由星星施加在物体上的某种影响肯

定会产生离心力。”

就我们目前所知，确实如此；目前我们还没有办法判断，假如周围没有星星和星云的话，是否还会存在离心力。我们没有能力去做这样一个实验，先移走所有的星云，然后再测量我们的旋转，因此，我们就是不知道。必须承认，这位哲学家可能是对的。因此，他回过神来，带着愉快的心情说道，“这个世界最终绝对需要变成这个样子：绝对的旋转毫无意义；它只是相对于星云而言的。”然后，我们就会对他说道，“那么，我的朋友，相对于星云的匀速直线运动不应该在一辆汽车内产生任何效应，这个结论是明显的还是不明显的呢？”既然运动不再是绝对的，而是相对于星云的运动，它就成了一个不可思议的问题，一个只能由实验来回答的问题。

那么，相对论对哲学的影响是什么呢？如果我们只是限制在这样一种意义上的影响，即相对性原理给物理学家带来了哪些新的观念和启示，那么，我们就可以讲一讲其中的一些影响。第一个发现主要是，即使那些长期以来一直保持有效并且已经被精确地检验过的观念都有可能是错误的。在经过了那么长久看似正确的年代之后，牛顿定律居然是错误的，这确实是一项令人震惊的发现。我们当然清楚，并不是实验错了，而是因为这些实验只是在一个有限的速度范围内做出来的，这些速度是如此之小，以至于相对论的效应一直不明显。尽管如此，我们现在对物理定律已经有了一种谦逊得多的观点——任何一件事物都可能是错的！

其次，如果我们有一套“奇特的”观念，比如说，当一个人运动时，时间流逝得较慢，如此等等，那么，我们是喜欢它们还是不喜欢它们，这是一个无关紧要的问题。惟一重要的问题是，这些观念是否与实验上的发现相符合。换句话说，这些“奇特的观念”只需要与实验相符合就行了，而我们不得不去讨论时钟的行为等问题的惟一的理由，就是要证明，虽然时间延缓的观念很奇特，但它却与我们测量时间的方式相协调。

最后，还有第三种启示，这种启示稍微多一点专业方面的成分，但最终却在我们研究其他物理定律时得到广泛的应用，这种启示就是，要考察物理定律的对称性，或者更明确地说，要找寻使物理定律经过变换之后仍然保持形式不变的方法。我们在讨论矢量理论时就注意到，当我们旋转坐标系时，基本运动定律并不改变，而现在我们又认识到，当我们以一种由洛伦兹变换提供的特别的方式改变空间和时间变量时，基本运动定律也不改变。于是，这个观念，即研究那些使基本定律保持不变的形式或者作用方式，已经被证明是一种非常有用的观念。

4-2 双生子悖论

为了继续有关洛伦兹变换和相对论效应的讨论，我们考虑一个著名

的问题，叫做彼得和保尔的“悖论”，设想这两个人是同时出生的双胞胎。当他们长大到能够驾驶宇宙飞船的年龄时，保尔以非常高的速度驾驶飞船飞向远方。由于留在地面上的彼得看到保尔飞得这样快，因此，在他看来，保尔的所有的钟似乎都走得更慢，他的心跳变慢了，他的思维过程变慢了，所有的事情都变慢了。当然，保尔并没有注意到任何不正常的事情，不过，如果他四处漫游了一段时间之后回到地面，他就会比留在地面上的彼得年轻！实际上这是对的；它是相对论的其中一个推论，而相对论是已经被清楚地证明了的。正如μ子在运动时生存更长的时间一样，保尔在运动时也将活得更久。只有那些认为相对性原理就意味着所有的运动都是相对运动的人才把这个推论叫做“悖论”；他们说道，“嗨，嗨，嗨，从保尔的观点看，难道我们不可以认为彼得在运动，因此他看起来应该衰老得更慢吗？由对称性可知，惟一可能的结论是，当两人相会时，大家的年龄应该一样。”但是，为了让他们重逢并进行比较，保尔要么必须在旅途的终点停下来并且进行对钟，要么更简单一点，他必须回来，而回来的那个人必定是在运动的人，他知道这一点，因为他必须掉过头来。当他掉过头来时，各种不寻常的事情都在他的宇宙飞船中发生了——火箭发射出去了，各种东西都被挤到舱壁上，如此等等——而彼得则一点也没有感觉到。

因此，这条规则应该这样说，感觉到加速度的那个人，看到了各种东西被挤到舱壁上等现象的那个人，如此等等，将是年轻一些的那个人；这就是他们两人在“绝对的”意义上的差别，而这肯定是正确的。当我们讨论运动的μ介子生存的时间更长这个事实时，我们利用它们在大气中的直线运动做例子。但是，我们也可以在实验室中制备μ介子，并且用一个磁场使它们沿着一条曲线运动，即使在这种加速运动中，它们的寿命的延长与在直线运动的情况下完全相等。虽然还没有任何人明确地安排过一个实验，使我们能够摆脱这个悖论，但是，人们可以把一个静止不动的μ介子与一个绕过整个圆周运动的μ介子做个比较，这样就肯定会发现，绕过一个圆周的那个粒子生存得更久。虽然我们实际上并没有用过一个完整的圆周进行实验，不过，其实并不需要这样做，这当然是因为，每一样事情都吻合得相当令人满意。对于那些坚持认为每一个单个的事例都要直接得到证实的人，这个例子也许不会令他们满意，不过，我们有充分把握来预言保尔做完整的一周运动这个实验的结果。

4-3　速度的变换

爱因斯坦的相对性和牛顿的相对性之间的主要差别是，把相对运动着的坐标系之间的坐标和时间联系在一起的变换规律不一样。正确的变化定律，即洛伦兹变换是

$$x'=\frac{x-ut}{\sqrt{1-u^2/c^2}},$$

$$\begin{aligned} y'&=y,\\ z'&=z,\\ t'&=\frac{t-ux/c^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \end{aligned} \tag{4.1}$$

这些方程对应于这样一种较为简单的情形，即两个观察者的相对运动是沿着他们的公共的x轴进行的。别的运动方向当然也是可能的，但是，最普遍的洛伦兹变换是相当复杂的，其中全部4个变量都混合在一起。我们将继续使用这种比较简单的形式，因为它包含了相对论的所有基本性质。

下面我们来讨论这个变换的更多的推论。首先，反解出这些方程是有意思的。更确切地说，这是一组线性方程组，4个方程有4个未知数，它们可以被反解出来，用x'，y'，z'，i'来表示x,y，z,i。结果非常有趣，因为它告诉我们，从一个“运动着”的坐标系上看，一个“处于静止”的坐标系是怎样的。当然，由于运动是相对的和匀速的，因此，“在运动”的那个人，如果他愿意的话，也可以认为，在运动的实际上是另一个人，而处于静止的是他自己。又由于这另一个人朝相反的方向运动，因此，他就应该得到相同的变换，但是速度的正负号要反过来。这正好就是我们通过数学推导得出的结果，因此，两者是一致的。如果得出的结果不是这样的话，那么，我们倒真的有理由要担忧了！

$$\begin{aligned} x&=\frac{x'+ut'}{\sqrt{1-u^2/c^2}},\\ y&=y',\\ z&=z',\\ t&=\frac{t'+ux'/c^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \end{aligned} \tag{4.2}$$

接下来我们讨论相对论中速度的合成这样一个有趣的问题。我们想到原先的一个难解之谜，光在所有参考系中都以186000英里/秒（1英里约为1.609千米）传播，即使这些参考系在做相对运动也是如此。以下要讲到的例子说明，这是更普遍的问题中的一个特殊的情形。设想在一艘宇宙飞船中有一个物体正以100000英里/秒的速度运动，而宇宙飞船

本身则正以100000英里/秒飞行；在一个外部的观察者看来，宇宙飞船中的这个物体运动得有多快呢？我们也许应该说200000英里/秒，这比光速还快。这非常令人沮丧，因为不能想象物体会跑得比光还快！下面来讲普遍的问题。

我们假设，对飞船里的人来说，飞船内的物体正以速度v运动，而宇宙飞船本身相对于地面具有速度u。我们想知道，在地面上的人看来，这个物体以多大的速度vx运动。这当然也还是一个运动沿着x方向进行的特殊情形。还有一个沿y方向的或者沿任意方向的速度的变换；这些都可以在需要时推导出来。在宇宙飞船内，速度是vx'，这表示位移x'等于速度乘时间：

$$x' = v_{x'} t'. \tag{4.3}$$

我们现在只需要算出，在外部观察者看来，一个x'和i'之间满足关系式（4.3）的物体的位置和时间。这样，只要简单地把式（4.3）代入式（4.2）中就得到

$$x = \frac{v_{x'} t' - u t'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \tag{4.4}$$

可是我们随即看到，x是用i'表示出来的。为了得出飞船外的人所看到的速度，我们必须用他的时间而不是用另一个人的时间去除他的距离！因此，我们还必须算出从飞船外所看到的时间，这个时间是

$$t = \frac{t' + u(v_{x'} t')/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \tag{4.5}$$

我们现在必须求出x与i之比，结果是

$$v_x = \frac{x}{t} = \frac{u + v_{x'}}{1 + u v_{x'}/c^2}, \tag{4.6}$$

已经把平方根消掉了。这就是我们寻找的规律：合成后的速度，即两个速度之“和”，并非正好是两个速度的代数和（我们知道不能这样，否则，我们就有麻烦了），而是被1＋uv/c²“修正”了。

下面让我们来看一看到底是怎么回事。假如你在宇宙飞船中正以一半光速的速度运动，而宇宙飞船本身也是以该速度飞行。这样，u和v都是c/2，而在分母中uv却是1/4，因此

$$v=\frac{\frac{1}{2}c+\frac{1}{2}c}{1+\frac{1}{4}}=\frac{4}{5}c.$$

这样看来，在相对论中，“一半”加上“一半”并不等于“1”，结果只等于“4/5”。当然，低速就可以用熟悉的方法相当容易地加起来，因为只要速度与光速相比是小的，我们就可以不考虑（$1+uv/c^2$）这个因子；但是，在高速下，事情就完全不同了，而且也相当引人入胜。

我们来考虑一种极限情形。纯粹为了好玩，假设宇航员正在宇宙飞船中观察光波本身。换句话说，$v=c$，而宇宙飞船还是在运动。在地面上的人看来会是怎样的呢？答案将会是

$$v=\frac{u+c}{1+uc/c^2}=c\,\frac{u+c}{u+c}=c.$$

因此，如果在飞船内有什么东西正以光速运动，那么，在地面上的人看来它还是以光速运动！这很好，因为它事实上就是爱因斯坦提出相对论的本来目的——由此可见，这个理论具有较好的成效！

当然，存在这样的情形，运动并不沿着匀速平移的方向。比如说，在飞船内可能会有一个物体正好相对于飞船以速度vy'“向上”运动，而飞船则“水平地”飞行。下面，我们就来做同样的推导，只是要用y方向的量而不是x方向的量，所得的结果是

$$y=y'=v_{y'}t'$$

所以，如果vx'＝0，就有

$$v_y=\frac{y}{t}=v_{y'}\sqrt{1-u^2/c^2}. \qquad (4.7)$$

因此，横向速度不再是vy'，而是$v_{y'}\sqrt{1-u^2/c^2}$了。我们通过将变换方程组做替换和组合而得出了这个结果，但是，由于以下的原因（再去探究

一下我们是否能够明白这个原因总是好的），我们也能够直接从相对性原理看出这个结果。我们已经讨论过（图3-3）一个合理的时钟在运动时怎样工作；在静止的坐标系中看，光以速度c倾斜一个角度传播，而在运动的坐标系中看，光以同样的速度只是沿垂直方向运动。当时我们发现，在静止的坐标系中，速度的垂直分量比光速小一个因子$\sqrt{1-u^2/c^2}$ [参见方程（3.3）]。不过，现在我们假设，让一个实物粒子在这同一个“时钟”内往返运动，只是其速度是光速的某个整分数1/n（图4-1）。于是，当粒子走完了一个来回时，光正好走完n个来回。这就是说，“粒子”钟的每一次“滴答”声将与光钟的第n次“滴答”声重合。这个事实在整个系统运动时必定还是正确的，因为重合这个物理现象在任何参考系中都将是一个重合的现象。因此，由于速度c_y小于光速，粒子的速度v_y就必定比对应的速度小同一个平方根因子！这就是平方根之所以会出现在所有垂直速度中的原因。

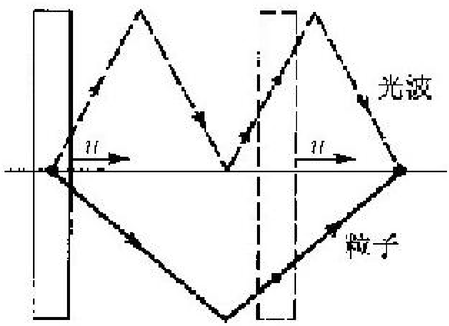


图4-1　在一个运动时钟内，一根光线和一个粒子描出的轨迹

4-4　相对论性质量

我们在上一章中认识到，物体的质量随着速度的增加而增加，但是，我们并没有像论证时钟的行为那样对此做过论证，从这个意义上说，我们并没有给出上述结论的任何说明。然而，我们能够证明，作为相对性原理和其他几个合理的假定的结果，质量必定按照这样的方式改变。（假如我们希望做有意义的推论，就不得不说“其他几个假定”这句话，因为，除非我们拥有某些假定为正确的定律，否则我们不可能证明任何结论。）为了避免研究力的变换定律，我们将分析一个碰撞问题，在这个问题中，除了假定动量和能量守恒之外，我们不需要知道关于力的任何定律。我们还要假定，运动粒子的动量是一个矢量，并且总是指向速度的方向。不过，我们将不再像牛顿那样，假定动量是一个常数乘以速度，而只是假定它是速度的某个函数。因此，我们把动量矢量写成某个系数乘以速度矢量：

$$\boldsymbol{p}=m_v\boldsymbol{v}. \tag{4.8}$$

我们在系数中写上一个下标v以提醒自己，这是一个速度的函数，并一致把这个系数mv叫做“质量”。当然，如果速度很小，它与那个通常在慢速运动的实验中测量到的质量是一样的。下面，我们将尝试从相对性原理，即物理定律在各个坐标系中必定相同，来论证mv的表达式必定是 $m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$ 假定有两个粒子，比如两个质子什么的，它们完全相同，并且以完全相等的速度彼此朝向对方运动。他们的总动量等于零。那么会发生什么事情呢？碰撞之后，它们的运动方向必定正好彼此相反，因为如果它们不是正好相反的话，就会存在一个非零的总动量矢量，而动量就不再守恒。它们还必定具有相等的速率，因为它们是完全一样的实体；事实上，它们必定具有与开始运动时同样的速率，因为我们假定在这些碰撞中能量是守恒的。所以，一个弹性碰撞，即可逆的碰撞，其示意图就会如图4-2（a）所示那样：所有的矢量长度相同，所有的速率相等。我们将假定，这样的碰撞总是能够安排下来的，任何角度θ都有可能发生，并且，在这样一种碰撞中，任何速率都可以用到。接下来我们注意到，同样这个碰撞可以通过坐标系的转动从不同的角度去观察，而正是为了方便起见，我们将把坐标系转到这样一个方位，使它的横轴将两个运动平均分开，如图4-2（b）所示。这是重新画出来的同一个碰撞的示意图，只不过把坐标轴转了个方向而已。

真正的技巧在于：让我们从某个观测者的角度来看看这个碰撞，这个观测者乘坐在一辆往前行驶的汽车中，这辆汽车的速度等于某个粒子的速度的水平分量。结果，这个碰撞看起来怎样呢？它看起来就好像第一个粒子正好笔直地向上运动，因为它的速度已经没有水平分量了，接着它又笔直地向下运动，也是因为它的速度没有水平分量。这就是说，这个碰撞看起来就如图4-3（a）所示那样。然而，第二个粒子却正以另一种方式运动，当我们乘车而过时，它看起来就好像以某个惊人的速度成一个较小的角度飞逝而过，但是，我们能够意识到，碰撞前和碰撞后的角度是相等的。让我们用u标记第二个粒子的速度的水平分量，用w标记第一个粒子的垂直速度。

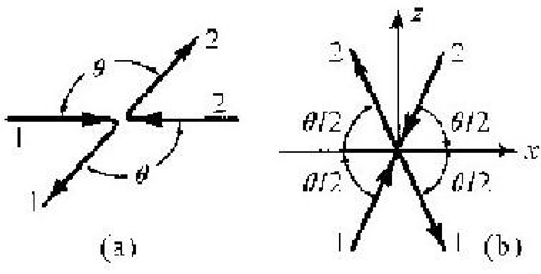


图4-2　两个相同的物体之间弹性碰撞的两种视图，这两个物体正以相同的速率朝相反的方向运动

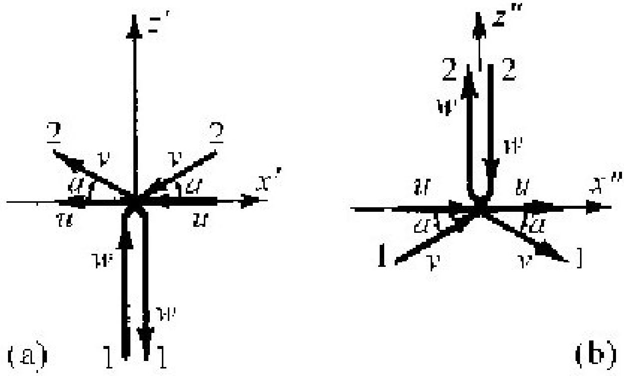


图4-3　从运动的汽车上去看碰撞的另外两种视图

下面的问题是，垂直速度utanα等于什么？如果我们知道这个量的话，就可以利用垂直方向上动量守恒的规律得到动量的正确的表达式。显然，动量的水平分量是守恒的：两个粒子在碰撞之前和碰撞之后的动量是相等的，而对第一个粒子来说这个量等于零。因此，我们只需要将守恒定律用到向上的速度utanα。但是，我们可以通过用另一种方式观察这同一个碰撞来得到向上的速度！如果我们从一辆（相对于第一个粒子）以速率u向左运动的汽车上观察图4-3（a）所示的碰撞，那么，我们看到同一个碰撞，只是如图4-3（b）所示的那样“颠倒”了。现在，第二个粒子是那个以速率w上下运动的粒子，而第一个粒子有了水平的速率u。当然，我们现在知道速度utanα等于什么了，它就是：

[参见公式（4.7）]。我们知道，做垂直 $w\sqrt{1-u^2/c^2}$ 运动的粒子的垂直动量的改变是

$$\Delta p = 2m_w w$$

（因子2是因它上下运动引起的）。那个斜向运动的粒子具有某个速度v，我们已经知道它的分量是u和w $\sqrt{1-u^2/c^2}$ ，而它的质量则是mv。因此，这个粒子的垂直动量的改变就是 $\Delta p' = 2m_v w\sqrt{1-u^2/c^2}$ ，因为，根据我们假定的规则（4.8），动量的分量总是等于与速度的数值相对应的质量乘速度在所考虑的那个方向的分量。这样，为了使总动量等于零，垂直方向的动量必定相抵消，于是，以速率w运动的质量和以速率v运动的质量之比必定等于

$$\frac{m_w}{m_v} = \sqrt{1-u^2/c^2} \tag{4.9}$$

我们来考虑w是无穷小的极限情形。如果w的确非常小，那么显然v和u实际上是相等的。在这种情况下，mw→m0，还有mv→mu。于是得

到一个重要的结果

$$m_u = \frac{m_0}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \qquad (4.10)$$

下面做一个有趣的练习，假定公式（4.10）是质量的正确表达式，检查一下公式（4.9）在任意的w值时是否确实成立。注意在公式（4.9）中要用到的速度v可以通过直角三角形来计算：

虽然我们刚才只是在小w的极限时使用这个公式，但我们将发现它是不言自明的。

$$v^2 = u^2 + w^2(1-u^2/c^2).$$

那么，让我们接受动量守恒和质量按照（4.10）式依赖于速度这两个结论，并继续考察我们还能得到别的什么结论。我们来考虑一种通常叫做非弹性碰撞的现象。为了简单起见，假定有两个以相等速率w朝相反方向运动的同类物体，它们如图4-4（a）所示那样相互碰撞后黏在一起，变成某个新的静止的物体。每一个物体相应于w的质量m，正如我们所知，等于$m_0/\sqrt{1-w^2/c^2}$如果假定动量守恒和相对性原理成立，那么，就能够说明一个有趣的、与这个新形成的物体的质量有关的事实。设想一个与w成直角的无穷小的速度u（我们可以用有限的u值做同样的处理，不过，用一个无穷小的速度更容易理解），然后，在一部速度等于-u的电梯上考察这同一个碰撞。我们所看到的现象如图4-4（b）所示。复合物体具有一个未知的质量M。现在，第一个物体以一个向上的速度分量u和一个实际上等于w的水平速度分量运动，第二个物体也一样运动。碰撞之后，就得到以速度u向上运动的质量M，假定这个速度u与光速相比是非常小的，与w相比也是很小的。动量必须守恒，因此，我们来估计一下碰撞之前和碰撞之后沿着向上方向的动量。在碰撞之前，我们有$p \approx 2m_w u$，而在碰撞之后，动量显然是$p' = M_u u$，不过，因为u是如此之小，所以M_u基本上与M_0一样。由于动量守恒，所以，这些动量必定相等，因此便有

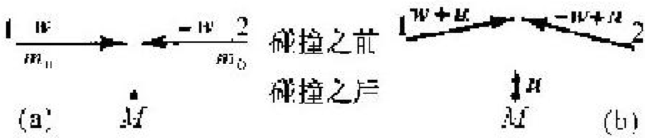


图4-4　质量相同的物体之间的非弹性碰撞的两种视图

$$M_0 = 2m_w. \qquad (4.11)$$

由两个相同的物体碰撞而形成的物体，其质量必定是相互碰在一起的物体的质量的两倍。大家也许会说，“是的，当然是这样的，这就是质量守恒嘛。”可是，这并不是那么容易就“当然是这样的”，因为，与它们静止不动时应该具有的质量相比，这些质量已经增大了，尽管如此，它们仍然有贡献，但是，对总的M来说，它们所贡献的并不是处于静止时具有的质量，而是更多。这看起来也许非常令人惊讶，为了使两个物体相互碰撞时动量守恒有效，即使这两个物体在碰撞后停了下来，它们结合后的质量也必定大于这两个物体的静质量！

4-5　相对论性能量

在上一章中我们证明了，作为质量依赖于速度和牛顿定律两者的结果，由力对一个物体做的总功导致的动能的改变总是

$$\Delta T=(m_u-m_0)c^2=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}}-m_0c^2. \qquad (4.12)$$

我们甚至更深入了一步，推测总能量是总质量乘c^2。下面我们继续这个讨论。

假定从M的内部仍然可以“看见”那两个相互碰撞的等质量物体。比如说，一个质子和一个中子被“黏在一起”，但仍然在M的内部游动。于是，虽然我们开始时可能认为质量M等于$2m_0$，但是，我们已经知道了它并不是$2m_0$，而是$2m_w$。由于$2m_w$是加进去的质量，而$2m_0$则是里边的东西的静质量，因此，复合物体的多余的质量就等于被带进去的动能。这当然就意味着能量具有惯性。在上一章中，我们讨论过一罐气体的加热，并说明了由于气体分子在运动，而运动的东西更重，当我们将能量输入气体中时，它的分子就运动得更快，因此气体就会变得更重。不过，事实上这种论证完全是一般性的，而我们关于非弹性碰撞的讨论表明，无论是不是动能，这些质量都是存在的。换句话说，如果两个粒子碰在一起并产生势能或者任何其他形式的能量；如果这两部分由于攀越势垒、克服内力做功等原因而慢下来；那么，质量等于加进去的总能量这个说法仍然是正确的。这样，我们就看到，我们在前面已经导出的质量守恒就等价于能量守恒，因此，严格地说，在相对论中并不存在牛顿力学中的那种非弹性碰撞。根据牛顿力学，两个物体碰撞后形成一个质量为$2m_0$的物体是毫无疑问的，它与把这两个东西慢慢地放在一起所形成的物体无任何区别。当然，我们从能量守恒定律中知道，新形成的物体的内部有更多的动能，但是，根据牛顿定律，这并不影响质量。不过，我们现在看到，这是不可能的；由于碰撞中包含了动能，结果，所产生的物体将更重；因此，它将是一个不同的物体。当我们慢慢地将两个物体放在一起时，它们形成一个质量等于$2m_0$的东西；当我们使劲将它们推到一起时，它们形成一个质量更重的东西。如果质量不同，我们就能断定那是不一样的东西。因此，在相对论中，能量守恒必然伴随着

动量守恒。

上述情况有一些有趣的推论。举例来说，假定我们有一个物体，已经测出其质量等于M，设想发生了一件什么事情，使这个物体突然分解成两块以速度w运动的大小相同的碎片，这样，每一块碎片就具有质量m_w。现在设想，这些碎片遇到了足够多的物质，使得它们减慢直到停下来；这时，它们将具有质量m_0。当它们停下来的时候，它们将会给这些物质多少能量呢？根据我们在前面已经证明了的法则，每一块碎片都将提供（mw-m0）c^2这么多能量。这么多的能量以某种形式如热、势能或者别的什么形式留在这些物质中。在上述情况下，$2m_w = M$，于是，被释放出来的能量就是$E =（M-2m_0）c^2$。举例来说，这个公式曾经被用来估计在原子弹的裂变中有多少能量被释放出来（虽然许多碎片并不正好相等，但它们是几乎相等的）。铀原子的质量是已知的——事先已经被测定过——它裂变产生的原子碘和氙等质量都是已知的。这里说到的质量，并不是指当原子在运动时的质量，而是指当它们处于静止时的质量。换句话说，M和m_0都是已知的。将这两个数相减，就可以计算出，如果M能够被分成“两半”的话，将有多少能量被释放出来。由于这个原因，可怜的爱因斯坦老头儿就一度被所有的报纸叫做原子弹之“父”。当然，所有这些只是意味着，如果我们告诉他将要发生什么过程，那么，他就可以事先告诉我们有多少能量会被释放出来。一个铀原子发生裂变时将要释放出来的能量，在第一次直接试验之前大约6个月就被估计出来了，而在能量实际上被释放出来的当下，就有人直接做了测量（假如爱因斯坦的公式不起作用，那么，他们无论如何也要测量能量），一旦他们把能量测量出来，就不再需要这个公式了。当然，我们不应该贬低爱因斯坦，而是应该批评报纸以及许多通俗文章对于在物理学和应用科学的发展中到底是哪一个促成哪一个这个问题的描写。至于怎样使事情以有效的和迅速的方式出现，这就完全是另一回事了。

上面的结果在化学上同样有效。举例来说，如果我们称一下二氧化碳分子的重量，并把它的质量与碳和氧的分子的质量做比较，就能计算出，当碳和氧化合形成二氧化碳时，有多少能量会被释放出来。这里惟一的麻烦是，质量的差异是如此之小，以至于在技术上非常难以做到。

现在，让我们转到这样一个问题，我们是否应该把m_0c^2加到动能中，并从现在开始认为，一个物体的总能量是mc^2。首先，如果我们仍然能够在M内观察静质量为m_0的组成部分，那么，我们就可以说，在复合物体的质量M中，一部分是它的各个组成单元的力学意义下的静质量，一部分是各个组成单元的动能，还有一部分是各个组成单元的势能。不过，我们已经发现，对大自然中经历上述类似反应的各种粒子，尽管世界各国做了大量的研究，还是未能看到其内部的组成单元。比如说，当1个K介子衰变成2个π介子时，就是根据公式（4.11）给出的规律进行的，但是，1个K介子由2个π介子组成这样的想法是一个毫无价值的想法，因为它也衰变成3个介子！

因此，我们有一种新的观念：我们不需要知道物体的内部由什么构

成；我们不能够也不需要区分，在一个粒子的内部，到底哪一部分能量是它的衰变产物的静能。将一个物体的总的mc2能量分开成内部结构的静能，这些结构的动能以及它们的势能是不方便的，而且常常是不可能的；取而代之的是，我们只是谈论粒子的总能量。我们通过向每一件东西加入一个常数m_0c^2来“改变能量的零点”，并认为，一个粒子的总能量等于动质量乘c^2，而当物体静止时，能量就是静质量乘c^2。

最后，我们发现速度v、动量P和总能量E以一种很简单的方式联系起来。相当令人惊讶的是，以速度v运动的质量等于静质量m_0被$\sqrt{1-v^2/c^2}$除这个公式很少被用到。取而代之的是，下面的两个关系很容易证明：

$$E^2-P^2c^2=m_0^2c^4 \tag{4.13}$$

以及

$$Pc=Ev/c. \tag{4.14}$$

而且最终发现它们原来非常有用。



第五章　空间和时间

5-1　空时几何学

相对论向我们表明，在一个坐标系中测量到的位置和时间，以及在另一个坐标系中所测量到的，两者之间不再是我们的直觉观念所预期的那种关系。透彻地理解洛伦兹变换中隐含着的空间和时间的关系是非常重要的，因此，我们在本章中将更深入地考察这个问题。

一位“静止不动的”观察者所测量到的坐标和时间（x,y，z,i），以及在以速度u飞行的“运动着的”宇宙飞船内测量到的相应的坐标和时间（x'，y'，z'，i'），两者之间的洛伦兹变换是

$$
\begin{aligned}
x' &= \frac{x-ut}{\sqrt{1-u^2/c^2}},\\
y' &= y,\\
z' &= z,\\
t' &= \frac{t-ux/c^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}}.
\end{aligned}
\tag{5.1}
$$

我们把这组方程与方程组（1.5）做个比较，方程组（1.5）也把两个坐标系的测量结果联系起来，在那里，其中一个坐标系相对于另一个坐标系做转动：

$$
\begin{aligned}
x' &- x\cos\theta + y\sin\theta,\\
y' &- y\cos\theta - x\sin\theta,\\
z' &- z.
\end{aligned}
\tag{5.2}
$$

在这个特别的情形中，莫和乔进行测量所使用的坐标系在x'轴和x轴之间有一个夹角θ。在每一种情况下，我们都注意到“带撇的”量是“不带撇的”量的“组合”：新的x'是x和y的组合，而新的y'也是x和y的组合。

做一个类比是有帮助的：当我们观察一个物体时，有一个显而易见的性质，可以称之为“视宽度”，还有一个性质，可以称之为“深度”。但是，宽度和深度这两个概念并不是物体的基本性质，因为，如果我们走到一旁，从一个不同的角度观察同一个物体，就会得到不同的宽度和不同的深度，而且，我们可以导出一些公式，用来从原来的量和所涉及的角度计算新的量。方程组（5.2）就是这样一个公式。人们可能会认为，一个给定的深度是所有深度和所有宽度的一种“组合”。假如物体是永远

不能动的，而且我们总是从同一个位置观察一个给定的物体，那么，这整件事情就完全不一样了——我们将总是看到“真实的”宽度和“真实的”深度，而且，它们看起来似乎具有完全不同的性质，因为一个量表现为对着视角方向的弦，而另一个量则涉及眼睛的聚焦甚至直觉；它们似乎是完全不同的量，并且永远不会被混起来。正是由于我们能够四处活动，因此才会认识到，从某种意义上说，深度和宽度只不过是同一事物的两个不同的方面。

难道我们不能以同样的方式看待洛伦兹变换吗？在这里也存在某种组合——位置和时间的组合。空间度量和时间度量之间的差异产生出一个新的空间度量。换句话说，某个观测者的空间度量，在另一个观测者看来，搀进了一些时间。上述的类比使我们产生这样的想法：由于某种原因，我们正在考察的物体的“真实性”（粗略地、直观地说）并不仅仅是它的“宽度”和“深度”，原因就是，这些属性到底怎样，取决于我们如何去观察它；当我们移到一个新的位置时，我们的头脑就会立刻重新计算它的宽度和深度。但是，当我们高速度运动时，我们的头脑并不会立刻重新计算坐标和时间，因为我们还没有任何以接近光速运动的实际经验去理解时间和空间也具有相同的本性这个事实。这就好比我们总是站在这样一个位置上，只能看到某个物体的宽度，不能以这样或那样的方式略微动一动脑袋；我们现在明白了，如果我们能够这样做的话，我们就应该看到另一个观察者的一些时间了——比如说我们会看到“推迟”一点的时间。

因此，我们将尝试在一种新的空间和时间混合在一起的世界中思考客观事物，这就好比物体在我们这个普通的空间世界中是真实的，而且能够从不同的方向去观察它一样。我们将认为，占有空间并持续一段时间的客观事物在新的世界中占有一个“小块”，而当我们以不同的速度运动时，就是从不同的角度去观察这个“小块”。这个新的世界是这样一个几何实体，其中每一个“小块”都通过占有位置并占据一段时间而存在，我们把这个几何实体叫做空时。在空时中，一个点（x,y，z,i）叫做一个事件。例如，设想在水平方向画出x轴，在另外两个方向画出y轴和z轴，它们两两互成“直角”并与纸面成“直角”，而在竖直方向画出时间轴。那么，在这样一个图上，比如说一个运动的粒子看起来会怎样呢？假如粒子是静止的，那么，它就具有一个确定的x，而随着时间流逝，它具有的x值不变；因此，它的“轨迹”就是一条平行于i轴延伸的直线[图5-1（a）]。另一方面，如果它慢慢地向外移动，那么，x就随着时间流逝而增加[图5-1（b）]。因此，比如说一个开始时向外运动并逐渐慢下来的粒子就会具有类似于如图5-1（c）中显示的那种运动。换句话说，一个永远不变的和不衰变的粒子在空时中用一条线来表示。一个衰变的粒子将用一条有分叉的线表示，因为它会从分叉点开始变成两个别的东西。

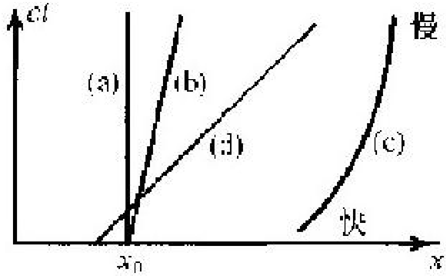


图5-1　三个粒子在空时中的轨迹：（a）一个静止于$x=x_0$处的粒子；（b）一个以恒定速度从$x=x_0$处开始运动的粒子；（c）一个以高速开始做减速运动的粒子

光波怎样呢？光波以速度c传播，而这将由一条具有确定斜率的直线表示[图5-1（d）]。

现在，按照我们的新概念，假如一个粒子经历了某个事件，比如说，假如它在某个空时点上突然衰变成两个沿着某些新的轨迹运动的新粒子，而且这个有趣的事件发生在某个x值和某个i值处，那么，我们就会预期，如果这有任何意义的话，只需要取一对新的坐标轴，并把它们转动一下，在这个新的坐标系中，我们就会得到新的i和新的x，如图5-2（a）所示。但这却是错的，因为方程组（5.1）与方程组（5.2）并不是完全相同的数学变换。要注意，比如说，这两组方程之间正负号的差别，还有，一组方程用cosθ和sinθ表示，而另一组方程则用代数量表示。（当然，将代数量写成余弦和正弦的形式并非不可能，但是，它们实际上不能这样写。）不过，这两组表达式还是非常相似。正如我们将要看到的，并非真的能把空时想象成一个真实的、普通的几何实体，原因就在于正负号的差别。事实上，虽然我们不会强调这一点，但结果证明，一个运动着的观察者必须使用一套与光线成相同倾角的坐标轴，用一种平行于x'轴和i'轴的特殊的投影方法得出他的x'和i'，如图5-2（b）所示。我们将不讨论这种几何学问题，因为这并没有多大的帮助；使用数学公式做研究更加容易一些。

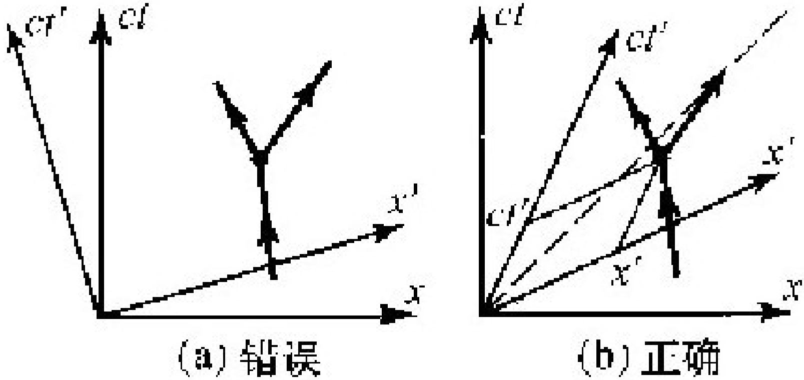


图5-2　一个正在衰变的粒子的两种视图

5-2　空时间隔

虽然空时几何并非通常意义下的欧几里得几何，但是，有一种与之非常相似的几何学，只是在某些方面显得有些奇特。如果这种几何学的概念是正确的，就应该存在一些与坐标系无关的坐标和时间的函数。比如说，在普通的旋转下，如果我们取两个点，为了简单起见，一个点取在原点处，而另一个点则在别的某个位置，两个坐标系具有相同的原点，那么，在两个坐标系中看，从原点到另一个点的距离是一样的。这是一个与测量距离的特殊方法无关的性质。距离的平方是$x^2+y^2+z^2$。空时几何的情况又怎样呢？不难证明，我们在这里也有某种保持不变的东西，那就是，$c^2t^2-x^2-y^2-z^2$这个组合在变换之前和变换之后是相同的：

$$c^2t'^2-x'^2-y'^2-z'^2=c^2t^2-x^2-y^2-z^2 \qquad (5.3)$$

因此，在某种意义上，这个量像距离一样是某种“真实的”东西；我们把它叫做两个空时点之间的间隔，在这个例子中，其中一个点在原点上。（当然，它实际上是间隔的平方，正如$x^2+y^2+z^2$是距离的平方一样。）因为它是在一种不同的几何中的量，所以我们给它起一个不同的名字，不过，惟一令人感兴趣的事情是，有几个正负号是相反的，而且有一个c因子在其中。

让我们把c去掉；如果我们打算找一个x坐标和y坐标可以相互交换的奇妙的空间，那真是一个荒唐的行为。一些没有经验的人可能会引起的混淆之一是，比方说，通过物体对眼睛的张角来判断宽度，而用一种不同的方法，例如聚焦所需要的肌肉的张力，来判断深度，这就好像用英尺来度量深度而用米来度量宽度一样。于是，在做像（5.2）式这样一类变换时，就会被变换方程搞得一塌糊涂，就会因为非常简单的技巧上的原因而看不到事情的清晰性和简单性，这个原因就是，相同的量用两种不同的单位来度量。现在，大自然用方程组（5.1）和（5.3）告诉我们，时间和空间是等价的；时间变成了空间；它们应该用相同的单位来度量。1“秒”有多远的距离呢？从（5.3）式很容易计算出有多远。是3×10^8米，即光在1秒内传播的距离。换句话说，如果我们打算用相同的单位“秒”来度量所有的距离和时间，那么，距离的单位就是3×10^8米，而方程式就会更简洁。另一个可以使单位相同的方法就是用米来度量时间。时间上的1米有多长呢？时间上的1米就是光传播1米所需要的时间，因而就是$1/3\times10^{-8}$秒，或者1秒的10亿分之3.3！换句话说，我们希望在$c=1$这种单位制下写出全部方程。如果时间和空间像前面所暗示的那样都用相同的单位来度量，那么，方程组就明显地精简得多了。这些精简了的方程是

$$x'=\frac{x-ut}{\sqrt{1-u^2}},$$

$$y'=y,$$

$$z'=z, \qquad (5.4)$$

$$t'=\frac{t-ux}{\sqrt{1-u^2}},$$

$$t'^2-x'^2-y'^2-z'^2=t^2-x^2-y^2-z^2. \qquad (5.5)$$

我们是否会担心，或者“害怕”使用了c＝1这个单位制之后，再也不能把方程组恢复原貌呢，答案正好相反。记住不写出c的方程组要容易得多，而通过对量纲做分析，总是很容易把c放回原处。比如说，在$1-u^2$中，我们知道不可能用纯粹的数字1去减有单位的速度平方，因此，我们就会知道，为了使这一项没有单位，必须用c^2去除u^2，这就是把方程变回原样的方法。

空时与普通空间之间的区别，以及与距离有关的间隔的特性是非常有意思的。根据公式（5.5），如果我们考虑在给定的坐标系中时间为零，只有空间坐标的一个点，那么，间隔的平方就是负的，我们就会得到一个虚的间隔，即一个负数的平方根。在相对论中，间隔既可以是实数也可以是虚数。一个间隔的平方既可以是正数也可以是负数，这与距离不一样，它的平方是正数。当一个间隔是虚数时，我们说两点之间有一个类空的（而不说是虚的）间隔，原因就是，这个间隔更像空间而不像时间。另一方面，如果两个物体在一个给定的坐标系中处于同一个地点，而只有时间不一样，那么，时间的平方是正数，而且距离是零，结果，间隔的平方是正数；这种间隔叫做类时的间隔。因此，在我们的空时图中就会有类似于这样的表示：在45°的方位上有两条直线（实际上，在四维中它们就是“圆锥面”，叫做光锥），在这两条直线上的点与原点的间隔都等于零。从某个给定的点发出的光与发光点的间隔总是零，正如我们从方程（5.5）看到的那样。顺便说一下，我们刚才已经证明了，如果在一个坐标系中光以速度c传播，那么，在另一个坐标系中它也以速度c传播，因为，如果间隔在两个坐标系中是相同的，即在一个坐标系中等于零，在另一个中也等于零，那么，说光的传播速度不变就等同于说间隔等于零。

5-3　过去、现在和未来

在一个给定的空时点的周围，空时区可以被分割成三个区域，如图5-3所示。一个区域中的间隔是类空间隔，另外两个区域中的间隔是类时间隔。从物理学的角度看，由一个给定点周围的空时划分成的这三个区域与该点之间有一种有趣的物理联系：一个物理客体或者一个信号能够以小于光速的速率从第二个区域中的某个点到达事件O处。因此，在这

个区域中的事件能够影响到O点，也能够从过去对其产生影响。当然，事实上一个在负i轴上处于P点的物体相对于O点而言正处于“过去”；它与O点是同一个空间点，只不过早些时候罢了。当时在那里发生过的事情，现在影响到O点。（遗憾的是，生活就是这样展开的。）在Q点的另一个物体能够以某个小于c的速率运动而到达O点，因此，如果这个物体处于一艘运动的宇宙飞船中，那么，它也将是该空间点的过去。更确切地说，在另一个坐标系中，时间轴可以通过O和Q这两个点。于是，在第二个区域中，所有的点都处于O点的“过去”，发生在这个区域中的任何事情都能够影响到O点。因此，第二个区域有时就叫做有影响的过去，即能够影响现在的过去；所有能够以任何方式影响O点的事件都发生在这里。

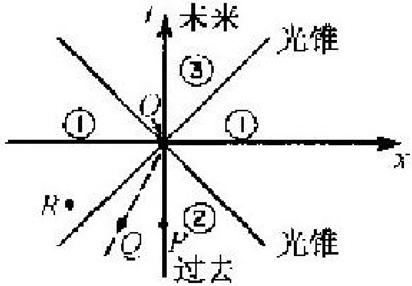


图5-3　原点周围的空时区域

另一方面，第三个区域是这样一个区域，我们可以从O点对其施加影响，在这个区域中，以小于c的速度射出的“弹丸”能够“击中”目标。因此，这是一个其未来能够受我们影响的世界，我们可以把这个区域叫做受影响的未来。现在还剩下空时的其余部分，即第一个区域，关于这个区域，令人感兴趣的事情是，我们既不能现在从O点影响它，它也不能影响现在处于O点的我们，因为没有任何东西能够跑得比光更快。当然，在R点发生的事情能够在稍后影响我们，这就是说，假如太阳“此刻”正在爆炸，那么，需要过8分钟我们才会知道这件事情，在这个时刻之前它不可能影响到我们。

我们用“此刻”这个词表示这样一种神秘的事情，我们既不能对其做出定义，也无法对其施加影响，但是它却能够在稍后影响我们，或者，假如我们在足够早的过去做过某件事情，就有可能已经影响它了。当我们观察半人马座α这颗恒星时，看到的是它4年前的样子；我们也许想知道它“现在”像个什么样子。“现在”指的是，从我们这个特殊的坐标系中看处于同一时刻。我们只能从我们的过去，即4年前，从半人马座α发出的光中来看它，但是，我们并不知道“现在”在那里发生着什么事情；在那里，“现在”所发生的事情需要等待4年才能对我们产生影响。半人马座α的“现在”只是我们头脑中的一个观念或者概念；它并不是在此时此刻从物理上可以真正定义的东西，因为我们必须等着去观测它；我们甚至不能就在“此刻”定义它。此外，“现在”取决于坐标系。例如，假定半人马座α正在运动，一个在那里的观测者就不会赞同我们的说法，因为

他要把他的坐标轴指向某一个角度，而他的“现在”将会是一个不同的时刻。我们已经讨论过有关同时性并不是惟一的这个事实。

有那么一些占卦算命的人，也就是那些告诉我们说他们能够预知未来的人，还有许多讲述某人突然发现自己具有预知未来的本领的神奇故事。唉，这就产生出许许多多自相矛盾的事情来了，因为，假如我们预知某件事情将要发生，那么，我们就肯定能够在适当的时间采取适当的措施去避免它，如此等等。可是，实际上甚至没有任何一个算命先生能够告诉我们现在怎么样！没有任何人能够告诉我们在任何合理的范围内此时此刻正在发生什么事情，因为那是不能观测的。我们可以向自己提出这样一个问题（这个问题将留给学生去尝试回答）：假如突然变得有可能预知处于第一个区域（即类空区）内的事件，这会产生什么自相矛盾的事情吗？

5-4　四维矢量的进一步讨论

下面，我们回到考察洛伦兹变换与空间坐标旋转的类比这个问题中去。我们已经学过这样一个方法，将与坐标具有相同变换性质的其他若干个量组合起来，构成所谓的矢量，即有向线段。就普通的旋转而言，有许多量的变换方式与x,y和z在旋转下的变换方式一样。比如说，速度有3个分量，即x分量、y分量和z分量；如果在一个不同的坐标系中观察，没有任何一个分量会保持相同，相反，它们全都变换成新的数值。可是，不管怎样，速度“本身”要比它的任何个别的分量具有更大的真实性，我们用一条有向线段表示它。

因此，我们要问：存在这样一些量，它们在一个运动的坐标系和一个不运动的坐标系之间的变换方式，或者说它们之间的相互联系与x,y,z和i之间的联系相同，这个说法对还是不对呢？我们从有关矢量的经验中得知，其中的3个量就像x,y,z一样，将构成一个普通的空间矢量的3个分量，而第4个量在空间旋转下看起来就像一个普通的标量，因为，只要我们不跑到一个运动的坐标系中去，它就不会改变。那么，用某种方式把我们称之为“时间分量”的第4个量与某些已知的“三维矢量”联系起来，使得这4个量一起按照空时中位置和时间的变换方式“旋转”，这是否有可能呢？下面我们将证明，确实存在至少一个这样的量（事实上存在许多这样的量）：动量的3个分量和作为时间分量的能量一起变换就构成一个所谓的“四维矢量”。在对此所做的证明中，由于不得不到处写上c这个量而相当不方便，所以，我们将采用在方程组（5.4）中用过的同样的技巧来处理能量、质量和动量的单位。例如，能量和质量仅仅相差一个因子c^2，这只不过是一个计量单位的问题，因此，我们可以认为，能量就是质量。我们令$E=m$而不一定非要写上c^2，当然，如果遇到什么麻烦的话，我们就会适当地插入若干个c，使计量单位在最终的方程中被改正过来，但是，中间的推导过程就不这样做了。

于是，关于能量和动量的方程就是

$$E=m=m_0/\sqrt{1-v^2}\ ,$$

$$\boldsymbol{p}=mv=m_0\boldsymbol{v}\sqrt{1-v^2}\ . \tag{5.6}$$

同样，在这些单位下有

$$E^2-p^2-m_0^2. \tag{5.7}$$

例如，如果我们用电子伏特来计量能量，那么，1电子伏特的质量是什么意思呢？它表示静能等于1电子伏特所对应的质量，即m_0c^2等于1电子伏特。比如说，一个电子的静质量等于0.511×10^6eV。

那么，在一个新的坐标系中，动量与能量像个什么样子呢？为了找出问题的答案，必须对公式（5.6）做变换，这是可以做得到的，因为我们知道速度如何变换。假定当我们对一个物体进行测量时，它具有速度v，不过，我们要从一艘本身正以速度u运动的宇宙飞船上观测这同一个物体，在该坐标系中，我们用撇号来标明相应的量。在开始时，为了把问题简化，我们将考虑速度v沿着u的方向这种情形。（稍后，我们可以考虑更一般的情形。）从宇宙飞船上看，速度v'等于多少呢？这是一个合速度，即v与u之“差”。根据我们在前面导出的规则，

$$v'=\frac{v-u}{1-uv}. \tag{5.8}$$

下面，我们来计算新的能量E'，即宇宙飞船上的那个家伙应该测出的能量。他当然应该使用同一个静质量值，不过就要用v'做速度。我们必须要做的事情就是，求v'的平方，用1去减它，再开平方根，并求倒数：

$$v'^2=\frac{v^2-2uv+u^2}{1-2uv+u^2v^2},$$

$$1-v'^2=\frac{1-2uv+u^2v^2-v^2+2uv-u^2}{1-2uv+u^2v^2}$$

$$=\frac{1-v^2-u^2+u^2v^2}{1-2uv+u^2v^2}$$

$$=\frac{(1-v^2)(1-u^2)}{(1-uv)^2}$$

由此可得到

$$\frac{1}{\sqrt{1-v'^2}}=\frac{1-uv}{\sqrt{1-v^2}\sqrt{1-u^2}}. \qquad (5.9)$$

于是，能量E'就等于m_0乘上述表达式。不过，我们想用不带撇号的能量和动量表示这个能量值，我们注意到

$$E'=\frac{m_0-m_0uv}{\sqrt{1-v^2}\sqrt{1-u^2}}=\frac{(m_0/\sqrt{1-v^2})-(m_0v/\sqrt{1-v^2})u}{\sqrt{1-u^2}},$$

也就是

$$E'=\frac{E-up_x}{\sqrt{1-u^2}}, \qquad (5.10)$$

我们看到，这个公式与下面的公式形式上完全一样

$$t'=\frac{t-ux}{\sqrt{1-u^2}}.$$

接着，我们必须找出新的动量p'x。这正好就是能量E'和v'的乘积，也可以用E和p简单地表示：

$$p'_x=E'v'=\frac{m_0(1-uv)}{\sqrt{1-v^2}\sqrt{1-u^2}}\cdot\frac{v-u}{(1-uv)}=\frac{m_0v-m_0u}{\sqrt{1-v^2}\sqrt{1-u^2}}.$$

这样就得到

$$p'_x=\frac{p_x-uE}{\sqrt{1-u^2}}, \qquad (5.11)$$

我们看到，这个公式与下面的公式形式上完全一样

$$x'=\frac{x-ut}{\sqrt{1-u^2}}.$$

这样，用原来的能量和动量表示新的能量和动量的变换规则，以及用i和x表示i'，用x和i表示x'的变换规则，两者完全一样：我们所要做的

事情就是，每当在（5.4）式中看到i时，就用E代入，而每当看到x时，就用px代入，这样，方程组（5.4）就会变成与方程（5.10）和（5.11）相同的方程。如果一切都正确的话，这就暗含着一条附加的规则p'y＝py和p'z＝pz。要证明这一点，就需要我们回过头去研究上下运动的情形。实际上，我们在上一章中已经研究过上下运动的情形。我们分析过一个复杂的碰撞过程，并且注意到，从运动着的坐标系中看，横向动量实际上并不改变；这样，我们就已经证明了p'y＝py和p'z＝pz。于是，完整的变换规则就是

$$
\begin{aligned}
p'_x &= \frac{p_x - uE}{\sqrt{1-u^2}},\\
p'_y &= p_y,\\
p'_z &= p_z,\\
E' &= \frac{E - up_x}{\sqrt{1-u^2}}.
\end{aligned}
\qquad (5.12)
$$

因此，我们在这个变换中找到了四个量，它们的变换方式与x,y，z和i的一样，我们把这四个量叫做四维动量矢量。由于动量是一个四维矢量，因此，在一个运动粒子的空时图中，可以把它表示成一条与轨迹相切的“有向线段”，如图5-4所示。这条有向线段有一个等于能量的时间分量，而它的空间分量则表示它的三维动量矢量；这条有向线段比能量和动量都更“真实”，因为能量和动量完全依赖于我们观察这个图的方式。

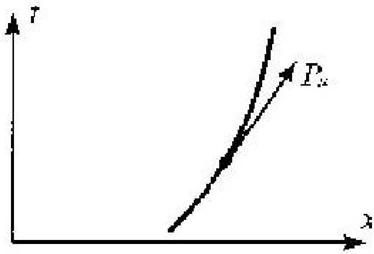


图5-4　一个粒子的四维动量矢量

5-5　四维矢量代数

四维矢量的表示方法不同于三维矢量的表示方法。在三维矢量的情形下，如果我们打算讨论普通的三维动量矢量，我们就会把它写成P。如果想说得更明确些，就可以说它有三个分量，它们在所讨论的坐标系下是p_x,p_y和p_z，也可以简单地写成一个一般的分量形式p_i，并认为i可以取x,y或者z，这就得到了三个分量；更确切地说，想象i是x,y或者z三个方向之中的任意一个方向。我们用来表示四维矢量的方法与这个情况相

似：我们写下pμ表示四维矢量，而μ代表四个可能的方向i,x，y或者z。

当然，我们可以使用任何我们想用的符号；不要小看符号这个东西；把它们发明出来是非常有用的。事实上，数学在很大程度上就是发明更好的符号。四维矢量的整个观念事实上就是符号表示法的一种改进，它使变换方程能够易于记忆。于是，Aμ就是一个一般的四维矢量，而对于动量这种特殊的情形，p_i就被确定为能量，p_x是x方向的动量，p_y是y方向的动量，还有，p_z是z方向的动量。要对四维矢量求和，就将相应的分量加起来。

假如四维矢量之间存在一个等式，那么，这个等式对每一个分量都成立。例如，如果在粒子碰撞中三维动量矢量守恒定律成立，即，如果大量相互作用着的或者相互碰撞的粒子的动量之和保持不变，就一定意味着所有粒子的动量在x方向、y方向和z方向的分量之和必须分别保持不变。在相对论中，单独这条定律是不可能成立的，因为它并不完整；这就好像只讨论一个三维矢量的两个分量一样。说它不完整，原因就是，如果我们转动坐标系，就会把各个分量混合起来，所以，在我们的定律中必须包括所有的三个分量。因此，在相对论中，我们必须推广动量守恒定律，使它包括时间分量，以达到完整。把这个分量与另外三个分量结合起来是绝对必要的，否则就不可能有相对论不变性。能量守恒是第四个方程，它与动量守恒一起在空间和时间的几何学中构成一个正确的四维矢量关系式。因此，在四维表示法中，能量和动量守恒定律为

$$\sum_{\text{参与碰撞的粒子}} p_\mu = \sum_{\text{碰撞产生的粒子}} p_\mu, \qquad (5.13)$$

也可以写成稍微不同的样子

$$\sum_i p_{i\mu} = \sum_j p_{j\mu}, \qquad (5.14)$$

式中i＝1，2，……代表参与碰撞的粒子，j＝1，2，……代表由碰撞产生的粒子，μ＝x,y，z或者i。有人会问，“用哪一个坐标系呢？”这没有关系。在任何坐标系中，这条定律对每一个分量都成立。

我们在矢量分析中讨论过另一个问题，即两个矢量的点乘。下面我们来考虑空时中相应的问题。我们在普通的旋转中发现，存在一个不变的量$x^2+y^2+z^2$。在四维中，我们发现相应的量是$i^2-x^2-y^2-z^2$[（5.3）式]。我们如何写出这个公式呢？一种方法是，画出某种像A_μ - B_μ这个样子的中间有一个方点的四边形；在实际中用到的一种表示法是

$$\sum_{\mu}{}' A_{\mu}A_{\mu}=A_t^2-A_x^2-A_y^2-A_z^2. \qquad (5.15)$$

Σ上面的撇号表示第一项，即“时间”项是正的，而其余三项带有负号。于是，这个量在所有坐标系中都相同，我们可以把它叫做四维矢量的长度的平方。举个例子，一个单粒子的四维动量矢量的长度的平方等于什么呢？它将等于$p_i^2-p_x^2-p_y^2-p_z^2$，或者换一种形式写成E^2-p^2，因为我们知道，p_i就是E。E^2-p^2等于什么呢？它必定是某个在所有坐标系中都相同的量。尤其是，在一个始终随同粒子一起运动的坐标系中，这个量必须是相同的，在这个坐标系中，该粒子静止不动。如果该粒子静止不动，那么，它就没有动量。这样一来，在那个坐标系中，粒子就只有纯粹的能量，这个能量就等于该粒子的静质量。于是，$E^2-p^2=m_0^2$。由此可见，这个矢量，即四维动量矢量的长度的平方等于m_0^2。

从一个矢量的平方出发，我们可以进而构造“点乘”运算，即乘积的结果是一个标量：如果a_μ是一个四维矢量，而b_μ是另一个四维矢量，那么，标量积就是

$$\sum{}' a_{\mu}b_{\mu}-a_tb_t-a_xb_x-a_yb_y-a_zb_z \qquad (5.16)$$

它在所有坐标系中都相同。

最后，我们要提一下某些静质量等于零的物体，例如一个光子。一个光子就像一个粒子，携带着能量和动量。一个光子的能量是某个常数（叫做普朗克常数）乘光子的频率：E＝hν。这样一个光子还携带着动量，而一个光子（事实上也是任何别的粒子）的动量等于h被波长除：p＝h/人。不过，对于一个光子而言，在频率与波长之间存在一个明确的关系：ν＝c/λ（每秒传过的波的数目乘每一个波的波长就等于光在1秒内传播的距离，这个数字当然就等于c）。于是我们立刻看到，一个光子的能量必定等于它的动量乘c，或者，如果c＝1，能量与动量相等。这就是说，静质量等于零。让我们再来看一看这个推理过程吧，这是一件相当奇特的事情。如果这是一个静质量等于零的普通粒子，那么，当它停下来时会出现什么事情呢？它永远不会停下来！它始终10^9以速度c运动。计算能量的一般公式是$m_0/\sqrt{1-v^2}$。那么，我们能否因为$m_0=0$和v＝1就认为能量等于0呢？我们不能认为能量等于零；尽管光子没有静质量，但是，它实际上可以（而且确实）具有能量，不过，它是通过永不停息地以光速运动来占有这份能量的！

我们还知道，任何粒子的动量都等于它的总能量乘它的运动速度：如果c＝1，p＝vE，或者在通常的单位制中，$p=vE/c^2$。对于任何以光速运动的粒子而言，如果c＝1就有p＝E。从一个运动的坐标系中看，一个光子的能量公式当然由公式（5.12）给出，不过，动量就必须用能量乘c（或者在上述单位制下乘1）来代替。经过坐标变换之后，不同的能量意味着具有不同的频率。这叫做多普勒效应，我们可以用公式

（5.12）很容易地把它推导出来，还要用到E＝p和E＝hv。

正如明可夫斯基所说的，“空间和时间将自然而然地退隐成为纯粹的阴影，只有它们之间的某种结合才得以幸免。”



第六章　弯曲空间

6-1　二维弯曲空间

牛顿认为，每个物体都吸引别的物体，吸引力的大小与两者之间的距离的平方成反比，而物体则以正比于力的加速度回应力的作用。以上说法就是牛顿的万有引力定律和运动定律。正如大家所知道的，这些定律解释了球体、行星、人造卫星、星系等物体的运动。

爱因斯坦对万有引力有一种不同的解释。他认为，重物附近的空间与时间（它们必须被组合起来形成空时）是弯曲的。物体在这个弯曲的空时中极力要沿着“直线”运动，这种趋势令它们以这样的方式运动。这是一个很难理解的概念——非常难以理解。这就是我们在本章中要做出解释的概念。

我们这个主题有三部分内容。一部分涉及引力效应；另一部分涉及已经讨论过的空时概念；第三部分涉及弯曲空时的概念。在开始时我们将简化要讨论的主题，不去过多地考虑引力的问题，并且不考虑时间变量——仅仅讨论弯曲的空间。稍后我们将讨论另外两个主题，但目前将集中讨论弯曲空间的观念——弯曲空间是什么意思，或者更准确地说，在爱因斯坦的理论中，弯曲空间是什么意思。结果表明，在三维空间中，甚至这样的问题目前也是有点难以理解的。因此，我们将首先更进一步简化这个问题，在二维的情况下讨论“弯曲空间”这个词的含义。

为了理解二维弯曲空间这个概念，你确实必须去体会一下一个生活在这种空间中的生物那带有局限性的观点。假如我们想象一只生活在一个平面上的没有眼睛的虫子，如图6-1所示。它只能在这个平面上运动，它没有认识“外部世界”的方法。（它并没有大家所具有的想像力。）我们当然要通过类比的方法来讨论。我们生活在一个三维的世界中，我们没有任何想像力去想象一个新的方向跳离我们这个三维世界；因此，我们不得不通过类比的方法来解决问题。这就好像我们是生活在一个平面上的虫子，在另一个方向存在着一个空间。这就是我们将首先通过虫子进行讨论的原因，记住，它必须生活在它的表面上，并且不能跳出去。

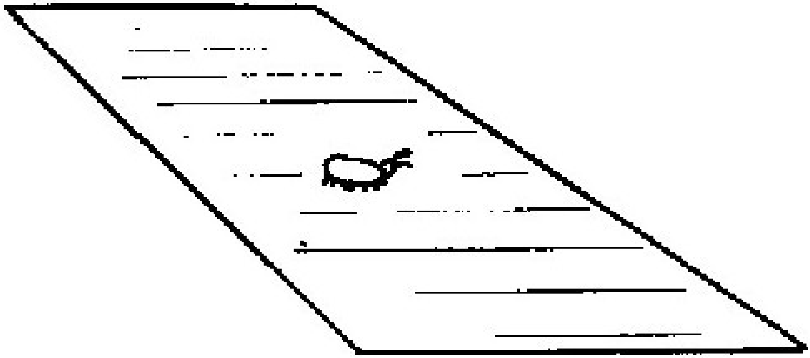


图6-1　一只在平面上的虫子

再举一个例子来说明一只生活在二维中的虫子，我们来想象一只生活在一个球面上的虫子。想象它能够如图6-2所示那样在球面上到处漫游，但它不能朝“上”，或者朝“下”，或者朝“外”看。

下面我们还要看一看第三种生物。它像别的两种生物一样也是一只虫子，也像我们的第一只虫子那样生活在一个平面上，但这个平面是特殊的。温度在不同的地方并不一样。还有，这只虫子以及它所使用的任何尺子都由遇热膨胀的相同的材料构成。每当它在某个地方放上一把尺子来测量某个东西时，这把尺子就立刻膨胀到该处温度下的固有长度。无论它把什么东西放在哪里——它自己、一把尺子、一个三角形，或者什么别的东西——这件东西自然就会因热膨胀而伸长。所有的东西在热的地方都比在冷的地方长，所有的东西都具有相同的膨胀系数。我们特别要考虑一种特殊的热板，它在中心处是冷的，随着我们往边上走，它变得越来越热（图6-3），尽管如此，我们还是要把我们这第三种虫子的家园叫做“热板”。

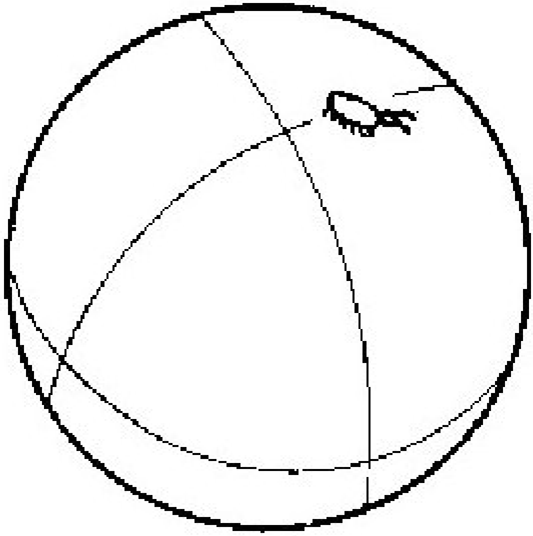


图6-2　一只在球面上的虫子

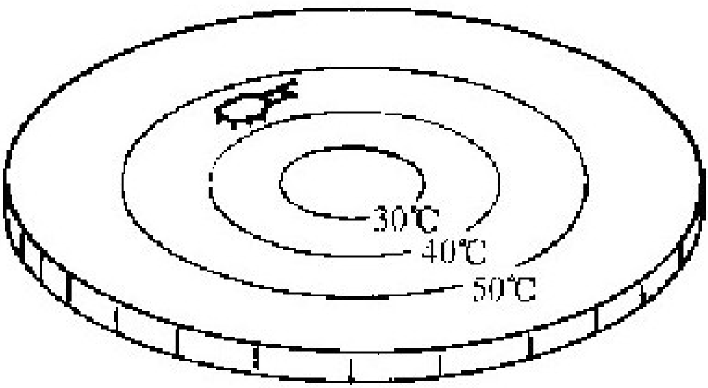


图6-3　一只在热板上的虫子

下面我们将想象这些虫子开始研究几何学。尽管我们把它们想象成是瞎子，这样它们就看不到任何“外部的”世界，但是，它们还是能够用它们的腿和触角干许多事情。它们能够画线、做尺子、测量长度。首先，设想它们从几何学中最简单的概念开始。它们学会怎样画一条直线——定义为两点之间最短的线。我们的第一种虫子（图6-4）会画非常直的线。可是生活在球面上的虫子怎样呢？它沿着两点之间——对它而言——的最短距离画出它的直线，如图6-5所示。这条线在我们看来也许像一条曲线，可是它没有任何办法跳离球面并发现“真的”有一条更短的线。它只知道，假如它在它的世界中尝试任何别的路线，它们都比它的直线长。因此，我们将让它把它的直线作为两点之间最短的弧线。（这当然是一个大圆上的一条弧线。）

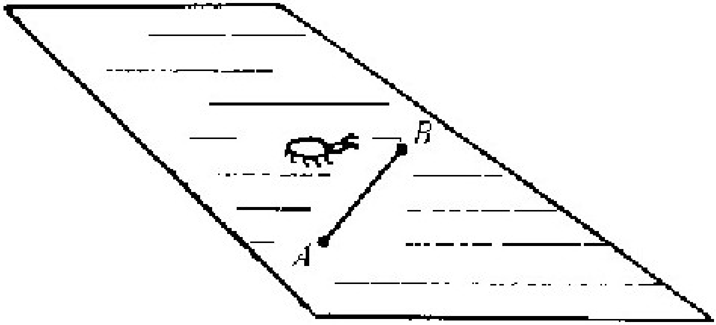


图6-4　在一个平面上画一条“直线”

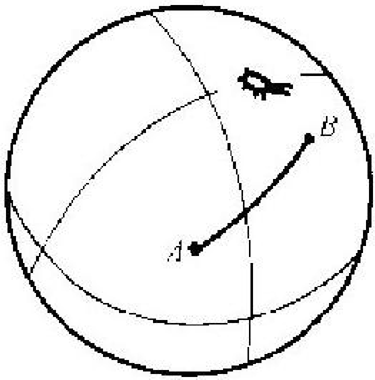


图6-5　在一个球面上画一条“直线”

最后，我们的第三种虫子（图6-3中的那种）也将画出一条在我们看来像曲线的“直线”。比如说，在图6-6中A和B之间的最短距离应该在一条如图所示的曲线上。为什么会这样呢？原因就是，当它的线朝外向着热板的较温暖的部分弯曲时，尺子（从我们那无所不知的观点来看）就逐渐地变得更长，而从A到B需要首尾相接地放置的“码尺”就更少。因此，对它来说，这条线是笔直的——它没有任何办法知道，在外部的一个陌生的三维世界中会存在某种生物，这种生物将把一条不同的线叫做“笔直的”。

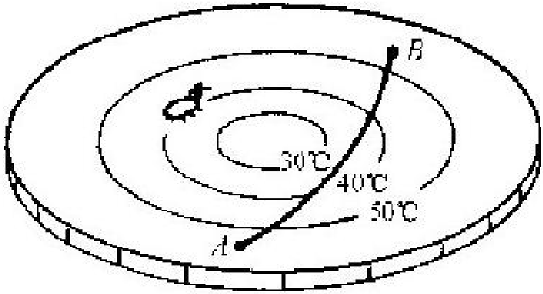


图6-6　在热板上画一条“直线”

我想，大家现在得到了这样一个概念，因此，余下的全部分析都将总是从生活在特定的表面上的生物的观点出发而不是从我们的观点出发。记住这个要求，我们来看一看它们的几何学的余下部分是个什么样子。让我们假定这些虫子全都学会了怎样画两条相交成直角的线。（你能够想象出它们会怎样做这件事。）于是，我们的第一种虫子（生活在普通平面上的那种）发现了一个有趣的事实。如果它从A点开始画一条100英寸（1英寸约为2.540厘米）长的线，然后转过一个直角并画另一条100英寸的直线，然后再转过一个直角并再画一条100英寸的直线，然后第三次转过一个直角并画第四条100英寸长的直线，它就会如图6-7（a）所示的那样，最后刚好画到开始的那一点上。这是它的世界的一个性质——它的“几何学”中的一个事实。

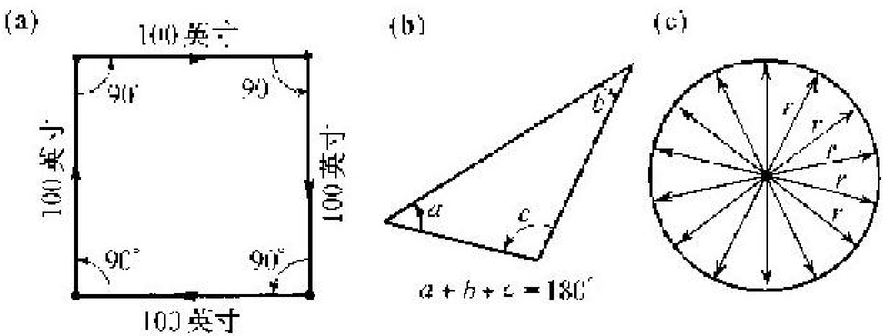


图6-7　在一个平直的空间中的正方形、三角形和圆

接着，它发现另一件有趣的事情。如果它画出一个三角形（一个由三条直线组成的图形），那么，三个角度之和就等于180°，即等于两个直角之和。参见图6-7（b）。

接下来，它画了一个圆。一个圆是什么东西呢？一个圆是这样画出来的：你从某个点出发向四面八方画直线，并标上许多与这个点距离相同的点。参见图6-7（c）。（我们必须小心在意我们是如何定义这些东西的，因为我们必须让另外两个家伙能够做类比。）当然，这个图形等价于这样一条曲线，你可以通过让一把尺子绕着一个点旋转来画出它。

不管怎么样，我们这些虫子学会了怎样画圆。接着有一天，它想测量一个圆的周长。它测量了几个圆，并发现了一条简洁的关系：圆周的长度总是等于同一个数字乘半径T（这当然就是从中心向外到曲线的距离）。周长与半径总是具有相同的比例——近似等于6.283——与圆的大小无关。

下面，我们来看一看别的两种虫子在它们的几何学中找到些什么东西。首先，当生活在球面上的虫子尝试画一个“正方形”时会出现什么事情呢？如果它遵循我们在前面描述的方法去做，它大概会认为结果几乎不会有什么麻烦。它得到了一个如图6-8所示那样的图形。它的终点B并不在起点A上，根本就画不出一个闭合的图形。拿一个球来试一试看。类似的情况出现在我们那生活在热板上的朋友那里。如果它画四条由直角连接起来的（用它的膨胀的尺子测量时）长度相等的直线，它就得到一个像图6-9那样的图形。

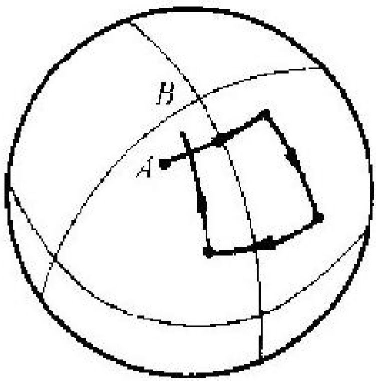


图6-8　尝试在一个球面上画“正方形”

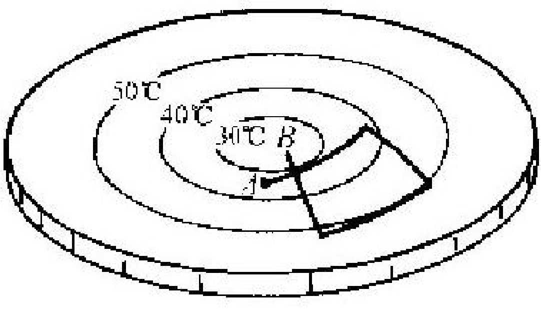


图6-9　尝试在热板上画“正方形”

下面假设我们的每一种虫子都有它们自己的欧几里得，它已经告诉它们，几何学“应该”是个什么样子，而它们已经在一个小的范围内通过进行粗略的测量大致上验证了它的结论。接着，当它们尝试在一个大的范围内画精确的正方形时，就会发现出错了。问题就在于，仅仅通过几

何学的测量，它们就会发现，麻烦出在它们的空间中。我们定义弯曲的空间是这样一个空间，在这个空间中，几何学并不是我们在平面上预期的那个样子。生活在球面上或者生活在热板上的虫子的几何学是弯曲空间中的几何学。欧几里得几何学的法则失效了。于是，为了认识到你生活于其中的世界是弯曲的，并不需要你能够使自己从表面上跳出来。为了认识到世界是一个球面，并不需要做环球航行。通过画一个正方形，你就能够认识到，你生活在一个球面上。如果画出来的正方形很小，你将需要很高的精确度，不过，如果这个正方形很大，测量就能够比较粗略地进行。

让我们以平面上的三角形为例子。3个内角之和等于180°。我们在球面上的朋友能够找到非常奇特的三角形。例如，它能够找到具有3个直角的三角形。千真万确！图6-10画出了一个。想象我们的虫子从北极开始画一条直线，一直往下画到赤道上。接着，它转过一个直角，并画出另一条长度一样的精确的直线。接着重复上面的步骤。用这个它挑选出来的非常特别的长度，正好回到开始的那一点，而且也是以一个直角与第一条线相交。因此，毫无疑问，对于它来说，这个三角形有3个直角，或者说内角之和是270°。结果，三角形的内角之和总是大于180°。事实上，多出的度数（对于图示的那种特殊的情形，就是多出的90°）与该三角形的面积成正比。如果一个在球面上的三角形非常小，它的内角之和就非常接近180°，仅仅大一点点。随着三角形不断增大，偏差就不断增加。生活在热板上的虫子从三角形中会发现相似的困难。

下面来看一看我们那些虫子在圆这个问题上找到些什么东西。它们画出圆周并测量其周长。比如说，生活在球面上的虫子可以画一个如图6-11所示那样的圆。它将发现圆的周长小于2π乘半径。（你能够明白这个结果，因为根据我们的三维视图的常识，它所谓的“半径”显然是一条比这个圆的真实半径更长的曲线。）设想生活在球面上的虫子学过欧几里得几何学，并决定用周长除2π来预言半径：

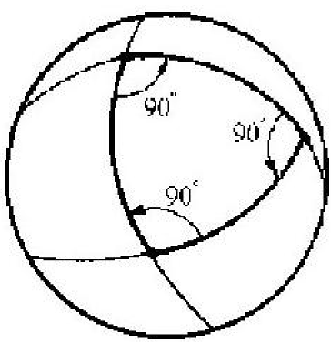


图6-10　在球面上一个“三角形”可以有3个90°的内角

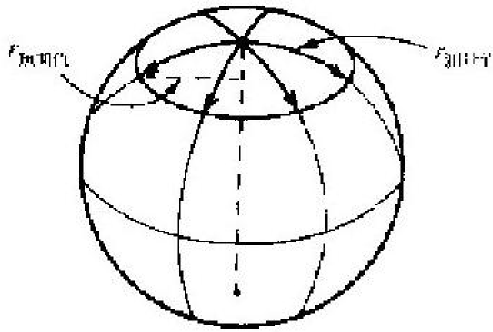


图6-11　在球面上画一个圆

$$r_{预期值}=\frac{C}{2\pi}. \tag{6.1}$$

于是，它就会发现，实测半径大于预期半径。继续研究这个问题，它可以把这个差额定义为“多出的半径”，写成

$$r_{测量值}-r_{预期值}=r_{多出值}. \tag{6.2}$$

并研究这种多出半径的效应怎样依赖于圆的大小。

我们那生活在热板上的虫子将发现相似的现象。想象它准备画一个如图6-12所示那样的圆，圆心在板上冷的部位。假如我们打算看着它画这个圆，就会注意到，它的尺子在靠近圆心处是短的，并随着尺子往外移动逐渐变长——尽管这只虫子无疑并不知道这一点。当它测量周长时，尺子自始至终是长的，因此，它也发现实测半径比预期半径C/2π长。热板虫也发现一种“多出半径的效应”。这种效应的大小还是依赖于圆的半径。

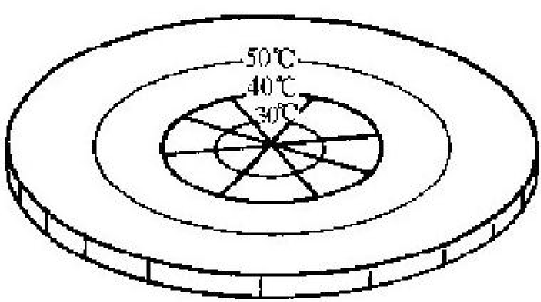


图6-12　在热板上画一个圆

我们将把这样一个空间定义为一个“弯曲空间”：在这个空间中，存在以下类型的几何误差：一个三角形的内角之和不是180°；一个圆的周

长被2π除不等于半径；画一个正方形的规则并不给出一个闭合的图形。你还可以想出其他的事情。

我们已经举出了弯曲空间的两个不同的例子：球面和热板。不过，如果我们选择热板上的温度变量是距离的适当的函数，那就有意思了，两种几何学将会一模一样。这个结果相当有趣。我们能够令生活在热板上的虫子与生活在球面上的虫子得到完全相同的答案。对于那些喜欢几何学及几何学问题的人，我将告诉你们这如何能够办得到。如果你假定尺子的长度（当由温度决定时）正比于1加上某个常数乘以与原点的距离的平方，那么，你就会发现，那块热板上的几何学在所有细节上（无穷远点除外）与球面上的几何学一模一样。

当然，存在别的种类的几何学。我们可能会向一只生活在一个梨形面上的虫子请教几何学，所谓的梨形面就是这样一种曲面，在某些地方具有较大的弯曲程度，而在别的地方具有较小的弯曲程度，这样，在它的世界中，在某个区域画出的小三角形与在另一个区域画出的相比，内角的超出就会更加严重。换句话说，空间的弯曲程度有可能处处不一样。这正是上述观念的一个推广。它也可以用热板上一个适当的温度分布来模拟。

我们还可以指出，有可能出现负的偏差这种结果。比如说，我们会发现，所有被画得非常大的三角形都具有小于180°的内角和。这看上去也许不可能，但情况确实如此。首先，我们可以做一个温度随着远离板心而降低的热板，于是，所有的效应都将反过来。不过，我们也可以考察鞍形面的二维几何学，用单纯的几何方法实现这种结果。想象一个如图6-13所示的鞍形面。接下来在这个面上画一个“圆”，它被定义为中心距相同的所有的点的轨迹。这个圆是一条具有起伏效应的振荡的曲线。这样，它的周长就比用2πT算出的预期值要长。因此，在这里C/2π就比T大。“多出的半径”是负的。

球面和梨形面等曲面都是正曲率的表面；而其他的面叫做负曲率的表面。一般说来，一个二维的世界将具有处处不一样的曲率，并且有可能在某些地方曲率为正，而在别的地方曲率为负。概括地说，弯曲空间指的就是这样一种空间，在这些空间中，由于出现正的或负的偏差而使欧几里得几何学失效。曲率的大小（比如说由多出的半径来定义）可以处处不一样。

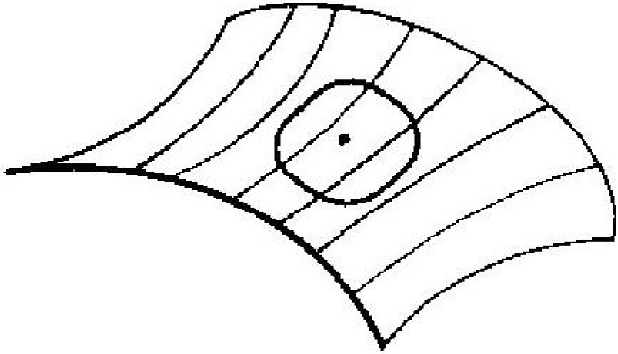


图6-13　鞍形面上的一个“圆”

应该指出的是，从我们对曲率的定义来看，一个圆柱面不是弯曲的，这相当令人惊讶。如果一只虫子生活在一个如图6-14所示那样的圆柱面上，它就会发现三角形、正方形和圆全都具有平面上相应图形所具有的性质。只要考虑一下，假如圆柱面被展开成平面，所有这些图形看起来会怎样，就很容易明白这一点。于是，可以用完全与平面相对应的方法画出所有的几何图形。因此，一只生活在一个圆柱面上的虫子（假定它不会一直走下去，而只是做局部的测量）没有任何办法察觉它的空间是弯曲的。在我们的理论直觉中，我们认为它的空间不是弯曲的。我们要谈论的东西更确切地叫做内部曲率：即只在局部区域进行测量就能够得出的曲率（一个圆柱面没有内部曲率）。爱因斯坦说我们的空间是弯曲的，他所指的就是这个意思。不过，到目前为止，我们仍然只是在二维的情况下定义了弯曲空间的概念；我们必须接着看一看，这个概念在三维的情况下可能会有什么意义。

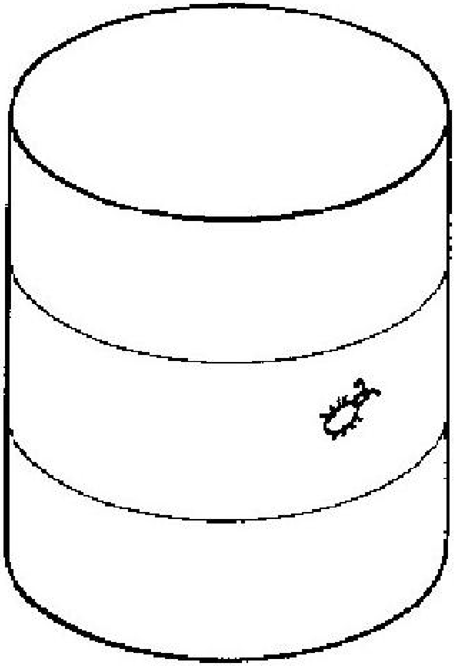


图6-14　一个内部曲率等于零的二维空间

6-2　三维空间的曲率

我们生活在三维空间中，我们准备去考察三维空间是弯曲的这样一种观念。大家会说，“可是你怎么能够想象它向任意方向弯过去呢？”唔，我们不能想象空间向任意方向弯过去，因为我们的想像力并不够（也许正因为我们不能想象得太多，所以从这个真实的世界中得不到太多的自由）。不过，我们无须跳离这个三维世界而仍然能够确定曲率。我们在二维的情况下一直在讨论的问题只不过是一种练习，显示我们怎么能够得到曲率的定义，它并不需要我们能够从外部“往里看”。

我们能够用某种方法来确定我们的世界是否是弯曲的，这种方法与那些生活在球面上或者热板上的绅士们所使用的方法非常相似。我们也许不能把这两种情形区分开，但是，我们肯定能够把这些情形与平直的空间即普通的平面区分开。怎样区分呢？太容易了：画一个三角形并测量各个内角。或者画一个大的圆周并测量其周长和半径。或者尝试画一个精确的正方形，或者构造一个立方体。对每一种情形都检验一下几何学的法则是否有效。如果这些法则失效，就认为我们的空间是弯曲的。如果画一个大的三角形而它的内角之和超过180°，就可以认为我们的空间是弯曲的。或者如果一个圆的实测半径并不等于它的周长除以2π，也可以认为我们的空间是弯曲的。

你将会注意到，在三维中情况要比在二维中复杂得多。在二维中，

任何一个位置都有一个确定的曲率值。可是在三维中，曲率可以有若干个分量。如果我们在某个平面上画一个三角形，如果把这个三角形所在的平面指向一个不同的方向，就可以得到一个不同的答案。或者举一个圆的例子，设想我们画一个圆并测量其半径，结果与C/2π不一致，于是半径有一定的超出量。接着如图6-15所示在垂直方向再画一个圆。两个圆的半径超出量不一定精确相同。事实上，在某个面上的圆可以有正的超出，而另一个面上的圆则有缺失（负的超出量）。

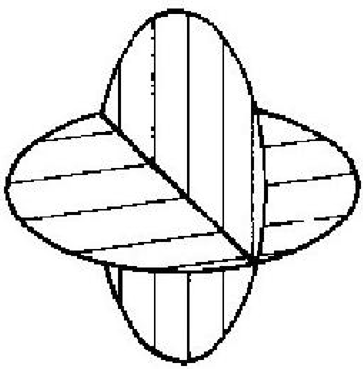


图6-15　不同指向的圆的半径超出量可以不一样

也许你正在考虑一个更好的主意：难道我们不能利用一个三维的球来回避这些分量吗？我们可以通过画出与空间中某个点的距离相同的所有的点来确定一个球。接着，我们可以通过在球面上划分细小的矩形网格，并将所有的面积元相加来测量球面的面积。根据欧几里得几何学，我们认为，总面积A就是4π乘半径的平方；于是，可以定义一个“预期的半径 $\sqrt{A/4\pi}$。不过，我们也可以通过挖一个通向球心的洞并测量这个洞的深度来直接测量半径。像前面一样，我们可以用实测半径减去预期半径，并把这个差值叫做半径的超出量。”

$$r_{超出值}=r_{测量值}-\left(\frac{测得的面积}{4\pi}\right)^{1/2},$$

这将是曲率的一个完全合适的度量。这种方法有明显的优点，它不依赖于一个三角形或一个圆怎样指向。

不过，一个球面的半径超出量也有不利的一面；它并没有完整地说明空间的特性。它给出的量叫做三维世界的平均曲率，因为其中存在一个对所有曲率的平均效应。然而，由于它是一个平均量，因此并没有完全解决确定几何结构这个问题。假如你只知道这个数字，你就不能预言空间几何结构的所有性质，因为你不可能知道不同指向的圆会发生什么变化。完整的定义需要在每一个点上用到6个“曲率数值”。数学家当然知道怎样写下所有这些数值。总有一天你可以在一本数学书中读到怎样

以一种高级的和精巧的形式把它们全部写下来，不过，最好还是先粗略地了解一下你试图写出的是什么东西。就我们的大多数目的而言，平均曲率应该是够用的。[11]

6-3　我们的空间是弯曲的

下面讨论主要的问题。上一节所说的有没有道理呢？更确切地说，我们生活于其中的现实的三维空间是弯曲的吗？人类一旦有了足够的想像力去认识这样一种可能性，即空间有可能是弯曲的，头脑中自然就会产生好奇心，渴望知道真实世界是否是弯曲的。为了尝试找到答案，人们做过直接的几何测量，但并未发现对平直的任何偏离。另一方面，通过对引力问题的讨论，爱因斯坦发现，空间确实是弯曲的，不过，我倒是愿意向各位讲一讲有关曲率数值的爱因斯坦定律讲的是什么，还要讲一讲有关他如何发现这个定律的一些故事。

爱因斯坦认为，空间是弯曲的，物质是弯曲的起因（物质也是引力的起因，因此引力与弯曲相对应——不过，这一点将在本章稍后再做介绍）。为了使事情更容易一点，我们设想，物质以某种密度连续分布，不过，物质的密度是可以随你所愿而到处不一样的，[12]爱因斯坦给出的有关曲率的规则如下：如果存在一个有物质分布于其中的空间区域，我们取一个足够小的球面，使其中的物质密度ρ近似为常数，那么，这个球面的半径超出量正比于球面内的质量。利用半径超出量的定义得到

$$\text{半径超出量} = r_{\text{测量值}} - \sqrt{\frac{A}{4\pi}} = \frac{G}{3c^2}\cdot M. \qquad (6.3)$$

式中G是（牛顿理论中的）万有引力常数，c是光速，$M = 4\pi\rho r^3/3$是球面内的物质的质量。这就是空间平均曲率的爱因斯坦定律。

假定取地球做例子，并忽略密度处处不一样这个实际情形——这样就不需要做积分了。假定我们打算非常仔细地测量地球的表面，然后挖一个通向地心的洞并测量它的半径。利用表面积可以计算出预期的半径，这个半径可以通过令面积等于$4\pi r^2$而得到。如果把预期半径与实测半径做比较，就会发现，实测半径比预期半径大，超出的数值由公式（6.3）给出。常数$G/3c^2$大约等于2.5×10^{-29}厘米/克，因此，对于每克物质来说，实测半径偏离预期值2.5×10^{-29}厘米。把地球的质量（大约等于6×10^{27}克）代入公式，结果是，地球的实测半径比根据其表面积预期应该具有的半径值大1.5毫米。[13]对太阳做同样的计算就会得到，太阳的半径大500米。

大家可能注意到，这条定律说，地球表面上方的平均曲率等于零。但是，这并不表示曲率的全部分量是零。地球上方仍然有可能存在（实际上就是存在）某种曲率。就平面上的一个圆来说，在某个指向上，它

具有正或负的半径超出量，而在另一个指向上，它却具有正负号相反的半径超出量。这条定律只不过给出这样一个结果，如果球面内部没有质量，那么，对球面做平均就等于零。顺便提一下，这条定律给出，在各个曲率分量与平均曲率随位置的变化之间存在某种关系。因此，假如知道了每一点的平均曲率，就能够计算出每一点上曲率的细节。地球上方的平均曲率随高度而改变，因此，空间是弯曲的。正是这种弯曲，我们把它视为引力。

设想在一个平面上有一只虫子，并假设这个“平面”上几乎没有什么疙瘩。无论在哪里有一个疙瘩，这只虫子就会断定，它的空间有少许弯曲的局部区域。在三维中，我们有相同的推断。无论在哪里有物质团块，我们的三维空间就有局部的弯曲——一种三维的疙瘩。

假如我们在一个平面上弄上许多肿块，那么，除了所有的疙瘩之外，还有可能存在一种整体的弯曲——表面可能会变得像一个球面。由于存在像地球和太阳这样的物质团块，我们的空间是否就不但具有局部的疙瘩，而且还具有某种净余的平均弯曲，探究一下这个问题是很有意思的。天体物理学家一直在尝试通过测量极其遥远的星系来回答这个问题。例如，我们在一个遥远的球形壳层内看到的星系的数目，不同于从有关这个壳层的半径方面的知识出发预期到的数目，那么，就会得到一个非常巨大的球的半径超出量的实测值。利用这种测量可望探明，我们的整个宇宙到底是弯曲的，还是平均来说平直的——到底是像一个球那样“封闭的”，还是像一个平面那样“开放的”。大家也许听说过有关这个课题的仍然在继续着的争论。存在争论是因为天文测量的结果仍然是完全不确定的；实验数据并没有精确到足以给出一个明确的答案。遗憾的是，有关我们的宇宙在大尺度上整体弯曲的状况，我们一点都不知道。

6-4　空时中的几何学

下面得来谈一谈时间了。我们在狭义相对论中讲到，空间的度量和时间的度量是互相关联的。要在空间中做某件事情而又不把时间包括进去，这有点不切实际。大家应该还记得，时间的度量依赖于观测者的运动速度。例如，我们观察一个乘坐宇宙飞船从旁边经过的家伙，就会发现，事情的发生对他来讲比对我们来讲更慢。打个比方吧，他迈着轻捷的步伐走开了，当我们的手表正好走过100秒的时候就返回来，他的手表可能显示他只出去了95秒。与我们的手表比较起来，他的手表（以及所有其他的过程）一直都走慢了。

下面来考虑一个有趣的问题。设想你是乘坐在宇宙飞船中的人。我们要求你在收到一个特定的信号时就动身，并正好在收到下一个信号——我们的时钟正好走过了，比如说，100秒时——回到你出发的地点。还要求你以这样的方式做这次漫步，你的手表应该显示出尽可能长的时间间隔。你应该怎样行动呢？你应该站着不动。假如你一直在走动，那么，当你回来的时候，你的手表走过的时间就会小于100秒。

另一方面，设想把问题做一点改变。假定我们要求你在收到一个特定的信号时就从A点出发走到B点（这两个点相对于我们是固定的），并且要做到正好在收到下一个信号（我们那固定的时钟走过了，比如说，100秒）时回到出发点。还是要求你以这样的方式做这次漫步，使得在到达终点时，你的手表显示出尽可能长的时间间隔。你应该怎样行动呢？走哪一条路以及如何安排这次漫步才能使得当你到达终点时你的手表显示出最长的时间间隔呢？答案是，如果你以均匀的速度沿着直线做这次漫步，那么，在你看来你就会花费最长的时间。理由是：任何附加的运动和极高的速度都会使你的时钟走得更慢。（由于时间的偏差依赖于速度的平方，你在某个地方因急速运动所丢失的时间，要通过在另一个地方缓慢移动来弥补，这永远办不到。）

以上所述的要点是，我们可以利用这个观念来定义空时中的“一条直线”。空间中的一条直线的类比是，在空时中以均匀的速度沿着一个恒定的方向的运动。

在空间中距离最短的曲线，在空时中并不是对应于时间最短的那条路径，而是对应于时间最长的那条路径，原因就是相对论中时间项的符号这件古怪的事情。于是，“直线”运动（“匀速直线运动”的类比）就是这样一种运动，在某个时刻从一个地点拿起一只手表，以这样一种方式在另一个时刻走到另一个地点，使得这只手表显示出最长的时间。这就是我们给空时中类似于直线的东西所下的定义。

6-5　引力和等效原理

下面我们准备讨论引力定律。爱因斯坦尝试创立一个与狭义相对论相容的引力理论，狭义相对论是他在早些时候创立的理论。他苦思冥想，最终悟出了一条重要的原理，这条原理引导他得出正确的定律。这条原理是根据失重的概念提出来的，当一件物体自由下落时，它内部的所有东西似乎没有重量。比如说，一颗在轨道上运行的人造卫星就在地球的引力中自由下落，它里边的宇航员就感觉到失重。更严格地陈述时，这个概念就叫做爱因斯坦的等效原理。它来自这样一个事实，所有的物体以完全相同的加速度下落，不管这些物体的质量有多大，也不管它们由什么东西构成。假如我们有一艘“依靠惯性飞行的”宇宙飞船（因此它就处于惯性运动状态），并有一位宇航员在里边，那么，支配着宇航员和飞船下落的定律是一样的。因此，如果他站在飞船的中央，他就会停留在那里。他并不相对于飞船下落。这就是我们说他“失重了”所表示的意思。

下面，假设你乘坐在一艘正在加速的火箭动力飞船中。相对于什么在加速呢？我们就只是这么说吧，它的发动机在开动，并且产生一个推力，因此，它并不是依靠惯性飞行而处于惯性运动状态。此外，还想象你在空无一物的太空中航行，因此，实际上没有一点引力作用在飞船上。假如飞船以“1g”的加速度加速前进，你就能够站在“地板”上，并感

受到正常的体重。还有，如果你松手放开一个球，这个球就会朝着地板“落下去”。为什么会这样呢？因为飞船正在“朝上”加速，但是，却没有力作用到球上，因此，这个球就不会加速；它将被留在后面。在飞船的里边，这个球就会显得好像具有一个朝下的、数值等于“1g”的加速度。

下面，我们把上述情形与在地球表面上静止不动的宇宙飞船中的情形做个比较。所有的事情都是一样的！你将受到朝向地板的力的作用，一个球将会以1g的加速度下落，如此等等。总之，在飞船的里边，你如何能够判断出，自己到底是停靠在地球的表面上，还是正在真空中加速前进呢？根据爱因斯坦的等效原理，假如你只是测量飞船里边发生的事情，那么，没有任何办法做出判断！

严格地说，上述说法只在飞船里边的一个点上是正确的。地球的引力场并不是绝对均匀的，因此，一个自由下落的球在不同的地点具有稍微不同的加速度——方向和大小都会改变。不过，假如我们想象一个严格均匀的引力场，那么，它在每一个细节上都完全由一个具有恒定加速度的系统来模拟。这就是等效原理的基本依据。

6-6　引力场中时钟的快慢

下面，我们打算利用等效原理来搞清楚在引力场中发生的一件古怪的事情。我将向大家说明在一艘火箭动力飞船中发生的一些事情，各位大概不曾预期过这些事情会在引力场中发生。设想我们把一个时钟放置在火箭动力飞船的“船头”（即放置在“前”端），并把另一个同样的时钟放置在“船尾”，如图6-16所示，我们就把这两个时钟叫做A和B吧。如果我们在飞船正在加速时比较这两个时钟，放置在船头的时钟相对于放置在船尾的时钟来说，看起来就要走得快一些。为了理解这一点，想象前面的时钟每隔1秒发射一束闪光，而你则坐在船尾对时钟B的滴答声与闪光的到达做比较。假定当时钟A发射一束闪光时，飞船在图6-17的a处，当这束闪光到达时钟B时，飞船在b处。稍后，当时钟A发射下一束闪光时，飞船将在c处，而当你看到这束闪光到达时钟B时，飞船将在d处。

第一束闪光走过一段距离L_1，而第二束闪光则走过一段较短的距离L_2。距离较短的原因是飞船正在加速，因而在第二束闪光发射时具有较高的速度。于是，大家就能够明白，假如这两束闪光是从时钟A处相隔1秒发射出来的，那么，它们就会以稍微小于1秒的间隔到达时钟B处，因为第二束闪光在传播途中并没有花那么长的时间。对于所有随后的闪光，也都会出现同样的情况。因此，假如你正坐在船尾，那么，你就会断定，时钟A走得比时钟B更快。假如你打算反方向做同样的事情，即让时钟B发射闪光而在时钟A处观测，那么，你将会断定B走得比A更慢。所有的事情都吻合得天衣无缝，完全没有什么不可思议的事情发生。

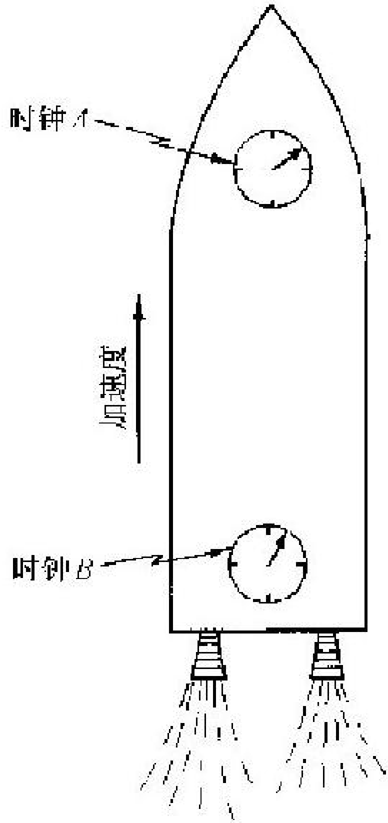


图6-16　一艘带着两个时钟的正在加速的火箭动力飞船

现在，我们来考虑静止在地球的引力场中的火箭动力飞船。同样的事情发生了。假如你带着一个时钟坐在地板上，并留意着另一个放置在高高的架子上的时钟，就会看到这个时钟比放置在地板上的时钟走得更快！你会说，“可这是不对的。两个时钟走过的时间应该一样。没有加速度，时钟看上去步调不一致，这没有任何理由。”不过，如果等效原理是正确的，情况就必定是这样的。爱因斯坦坚持认为这条原理本来就是正确的，并且大胆而恰如其分地干下去。他指出，放置在引力场中不同地点的时钟看起来必定走得快慢不一样。可是，如果一个时钟看起来总是与另一个时钟走得快慢不一样，那么，就第一个时钟而言，另一个时钟就会以不同的计时速率运转。

现在大家看到了吧，我们得到了与前述的热尺子时钟类似的东西，当时，我们让一只虫子呆在一块热板上。我们想象那些尺子和虫子等在各种温度下以相同的方式改变长度，这样，当它们在热板上四处活动时，根本不会知道它们的量尺在不断改变。处于引力场中的时钟具有同样的特性。我们放置在较高处的每一个时钟看起来都走得更快。心跳更快，所有的过程都进展得更快。

假如不是这样的话，我们就能够区分一个引力场与一个加速参考系

之间的差别了。时间能够在各点不一样是一个非常难以理解的观念，不过，它是爱因斯坦所用过的观念，而且是正确的观念——信还是不信，悉听尊便。

利用等效原理能够搞清楚，一个时钟的快慢在引力场中如何随着高度而改变。我们只计算在一艘正在加速的火箭动力飞船中，两个时钟之间的表观差别。做这件事情最简单的方法是利用我们在第一卷第34章[14]有关多普勒问题中得出的结果。在那里，我们发现[参见原《物理学讲义》公式（34.14）]，假如v是发射源与接收器之间的相对速度，那么，接收频率ω通过以下公式与发射频率ω_0相联系

$$\omega=\omega_0\frac{1+v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \tag{6.4}$$

现在，假如我们考虑图6-17中正在加速的火箭动力飞船，发射器和接收器在任意瞬间都以相等的速度运动。但是，在光信号从时钟A传播到时钟B这段时间内，飞船已经加大了速度。事实上，它已经获得了gi大小的附加速度，其中g是加速度，i是光从A传播到B这段距离H所需要的时间。这段时间非常接近H/c。因此，当信号到达B时，飞船的速度已经增加了gH/c。在信号到达接收器的一瞬间，接收器相对于发射器总是具有这个速度。因此，这个速度就是我们将要用在多普勒频移公式（6.4）中的速度。假定飞船的加速度和长度都足够小，使得这个速度比c小得多，于是就可以忽略平方项v^2/c^2。由此得到

$$\omega=\omega_0\left(1+\frac{gH}{c^2}\right). \tag{6.5}$$

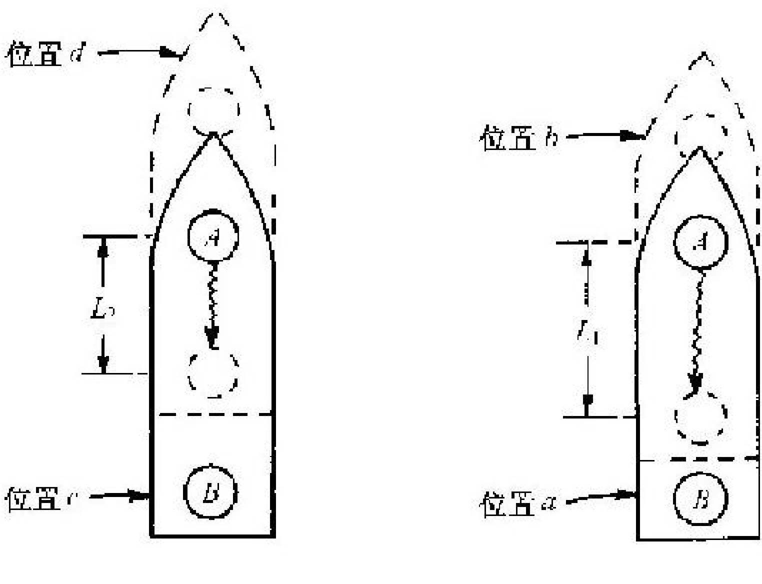


图6-17 在一艘加速前进的火箭动力飞船中，放置在船头的时钟看起来比放置在船尾的时钟走得更快

这样，对于放置在飞船上的这两个时钟就得到如下关系：

接收器的速率＝发射器的速率（$1+gH/c^2$）（6.6）

其中H是发射器高出接收器的高度。

利用等效原理可以得出，在自由下落加速度等于g的引力场中，由高度H分隔开的两个时钟必定具有相同的结果。

这是一个如此重要的观念，因此，我们愿意证明它也是根据物理学的另一条定律即能量守恒定律得出的。我们知道，作用在一个物体上的万有引力正比于它的质量M，质量通过公式$M=E/c^2$与其总内能E相联系。例如，由核反应的能量确定下来的原子核的质量，以及由原子的重量得到的质量，两者是相一致的。核反应使一个原子核蜕变成另一个原子核。

下面，考虑这样一个原子，它具有一个总能量为E_0的最低的能态和一个较高的能态E_1，它能够通过发光而从E_1态跳到E_0态。发出的光的频率ω由下式给出：

$$\hbar\omega=E_1-E_0. \tag{6.7}$$

现在，假设有这样一个处于E_1态的原子，它静止在地板上，我们把它从地板的位置带到高度为H的位置。为了做到这一点，我们在把质量$m_1=E_1/c^2$往上提时，必须克服万有引力做一些功。所做的功的数值是

$$\frac{E_1}{c^2}gH. \tag{6.8}$$

接着，让这个原子发射一个光子并跳到较低的能态E_0。随后，把这个原子带回地板上。在回程中质量等于E_0/c^2；我们取回了以下数值的能量

$$\frac{E_0}{c^2}gH, \tag{6.9}$$

这样，我们就做了等于以下数值的净功

$$\Delta U=\frac{E_1-E_0}{c^2}gH. \tag{6.10}$$

这个原子在发射光子时要释放出能量E_1-E_0。现在，假设释放出的光子正好向下传播到地板处并被吸收。这个光子在那里会交出多少能量呢？初看起来大家也许会认为，它将交出正好E_1-E_0那么多的能量。可是，如果能量守恒的话，就不可能这样，看一看下面的讨论大家就会明白了。我们以在地板处具有能量E_1开始。整个过程结束时，地板处具有的能量是原子处于其较低能态时的能量E_0加上从光子中得到的能量E_{ph}。其间我们必须提供由公式（6.10）给出的附加能量△U。如果能量是守恒的，那么，结束时地板处的能量必定大于开始时的能量，多出的能量值正好是我们所做的功。即必定有如下结果

$$E_{ph}+E_0=E_1+\Delta U,$$

或者

$$E_{ph}=(E_1-E_0)+\Delta U \qquad (6.11)$$

事情必定是这样的，这个光子不会带着正好等于被发射时具有的能量E_1-E_0到达地板处，而是带着更多一些能量。不然的话，就会有一些能量丢失了。如果将由公式（6.10）算出的△U代入公式（6.11）中，就得出光子带着以下数值的能量到达地板处

$$E_{ph}=(E_1-E_0)(1+\frac{gH}{c^2}). \qquad (6.12)$$

可是，一个能量等于E_{ph}的光子的频率$\omega=E_{ph}/h$。用ω_0表示被发射的光子的频率——根据公式（6.7），它等于（E_1-E_0）/h——公式（6.12）的结果再次给出光子在地板处被吸收时的频率与被发射时的频率之间的关系式（6.5）。

还可以用另一种方法得出相同的结果。一个频率为ω0的光子具有能量$E_0=h\omega_0$。由于能量E_0具有引力质量E_0/c^2，因此，光子具有质量（不是静质量）$h\omega_0/c^2$，要被地球“吸引”。在下落距离H的过程中，它将获得附加的能量（$h\omega/c^2$）gH，因此，它到达地板时具有如下的能量

$$E=h\omega_0\left(1+\frac{gH}{c^2}\right),$$

然而，在下落之后它的频率是E/h，这又一次给出公式（6.5）中的结果。只有当爱因斯坦有关引力场中的时钟的预言正确无误时，有关相对论、量子物理学和能量守恒的观念才会全部吻合。在一般情况下，我

们正在讨论的频率改变是非常小的。比如说，在地球表面上，20米的高度差引起的频率差异只有大约2×10-15。然而，就是这样一个改变，最近已经利用穆斯堡尔效应从实验上探测到。[15]爱因斯坦完全正确。

6-7　空时的曲率

下面，我们要把刚刚讨论过的问题与弯曲空时的观念联系起来。我们已经指出，假如在不同的地点时间以不同的速率演进，那么，它就类似于热板那样的弯曲空间。不过，这不仅是一个类比；它意味着空时确实是弯曲的。让我们尝试考虑空时中的某些几何学问题吧。乍一听这可能有点特别，不过，我们曾经多次画过空时图，图中距离沿着一根轴画，时间则沿着另一根轴画。设想我们尝试在空时中画一个矩形。首先按照图6-18（a）的样子绘制一个高度H对时间的关系图。为了画出矩形的底部，找一个静止于高度H_1处的物体，沿着它的世界线画出100秒。我们得到图6-18（b）中的BD线，它平行于i轴。接着，找另一个在i＝0时刻位于第一个物体上方100英尺（1英尺约为0.3048米）处的物体。它在图6-18（c）中开始于A点。接着，沿着它的世界线根据A处的时钟画出100秒。这个物体从A一直画到C，如图6-18（d）所示。但是，注意到由于在两个高度处时间走得快慢不一样（假定存在一个引力场），C和D这两点并不同时。假如我们如图6-18（e）所示那样，向同一时刻位于D点上方100英尺（1英尺约为0.3048米）处的C'点画一条线，试图这样来把正方形画好，这个正方形就不会闭合。这就是我们说“空时是弯曲的”这句话所要表达的意思。

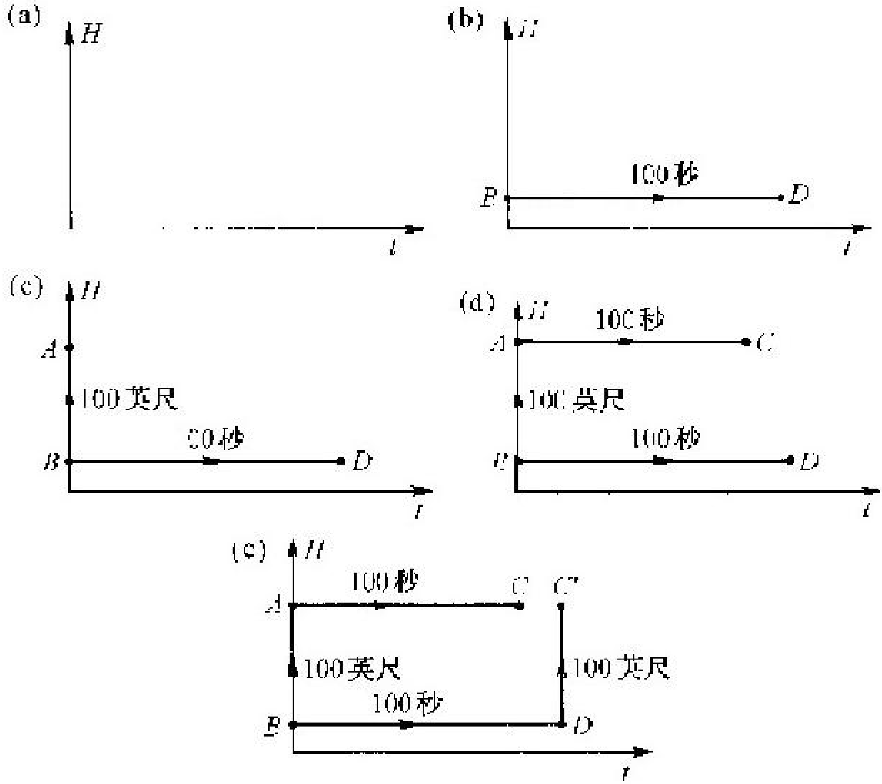


图6-18　在空时中尝试画一个矩形

6-8　在弯曲的空时中运动

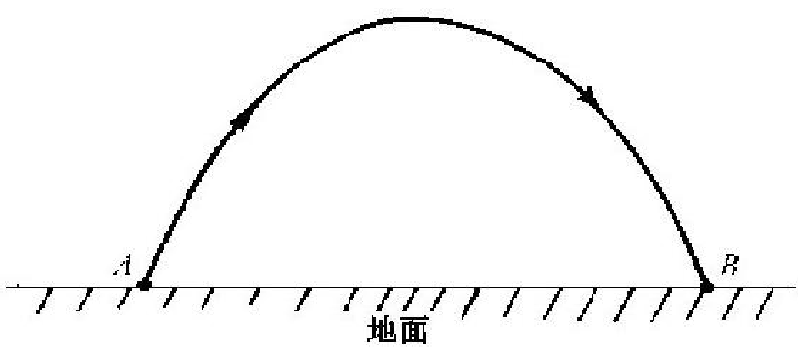


图6-19　在一个均匀的引力场中，对一段确定的持续时间，具有最大原时的轨迹是一条抛物线

我们来考虑一个有趣的智力小游戏。有两个同样的时钟A和B，它们如图6-19那样一起被放置在地球的表面上。现在，我们把时钟A提到某个高度H，在那里停留片刻，再把它放回地面，使得它刚好在时钟B走过100秒时回到原来的位置。这时，时钟A将走过大约107秒，原因是，它

在被提到空中时要走得更快。下面就是我们要考虑的难题了。我们应该怎样移动时钟A才能使它尽可能走过最长的时间——始终假定它在时钟B走过100秒时返回？大家会认为，“这很简单。只要把它举得尽可能地高就行了。结果，它就会走得尽可能地快，这样，当你回来的时候，这个时钟就会走过最长的时间。”不对。你忘记了某些东西，我们只有100秒的往返时间。假如我们上升得非常高，那么，为了在100秒内到达那里并返回，就必须上升得非常快。但不要忘记狭义相对论效应，它导致运动的时钟按照因子 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 的倍数走慢了。这个相对论效应趋向于使时钟A的读数小于时钟B的读数。大家看到了，这有点像玩某种策略游戏。假如我们带着时钟A站着不动，就经历100秒。假如我们慢慢地升高一点点再慢慢地下来，就会经历比100秒更长一些的时间。假如我们上升得更高一些，也许就会经历更长一些的时间。可是，假如我们上升得太高了，那么，为了到达那里，就必须快速地上升，这就有可能使时钟变慢得足以在小于100秒时回到出发点。高度与时间成怎样的函数关系——即上升多大的高度，用多大的速度到达那里，把这些因素仔细调节好，使得我们在时钟B走过100秒时回到出发点——才会使时钟A的时间读数尽可能达到最大呢？

答案是：计算一下需要多大的速度把一个球扔到空中，使得它刚好在经过了100秒时回落到地面上。这个球的运动过程——快速上升，减慢，停下来，往回下落——正好就是所要求的运动过程，它使固定在球上的手表显示的时间达到最大。

下面考虑一个稍微不一样的游戏。在地球的表面有两个相互隔开一段距离的点A和B。我们来玩一个前面玩过的游戏，找出我们称之为直线的线段。我们要问，从A到B应该怎样走才能使我们随身带着的手表走过最长的时间——假定出现一个给定的信号时我们就在A点动身，而当B点出现另一个信号时就到达B点，这第二个信号在一个固定的时钟走过，比如说，100秒时出现。大家马上会说“唔，我们以前就得出，要做的事情就是沿着一条直线以一个选定的均匀速度惯性滑行，以便正好在100秒后到达B点。假如我们不沿着一条直线运动，就需要更高的速度，而我们的手表就会慢下来。”可是先别着急！这是还没有考虑引力时的情况。把轨迹往上弯一点点，然后再把它弯下来不是更好吗？于是，在某一段时间内，我们不就会上升得高一点，而我们的手表不就会走得快一点吗？确实是这样的。假如你去求解这个数学问题，即调整运动曲线以便使运动手表所经历的时间尽可能达到最大，就会发现，这个运动是一个抛物线运动——在引力场中沿着无阻力弹道轨道运动的物体具有相同的曲线，如图6-19所示。因此，在引力场中的运动定律也可以这样陈述：一个物体总是按照这样的方式从一个地点运动到另一个地点，使得一个固定在它上面的时钟所走过的时间，比按照任何其他可能的轨迹运动时走过的时间更长——当然是在相同的起始条件和结束条件下进行。由一个运动的时钟所测得的时间常常叫做“原时”。在自由下落中，这条轨迹使一个物体的原时达到最大。

我们来看一看这一切是如何进行的。我们从公式（6.5）开始，这个

公式给出运动时钟的超出率为

$$\frac{\omega_0 gH}{c^2}. \qquad (6.13)$$

除此之外，我们还必须记住，运动速度还会引起一个符号相反的改正。我们知道这个效应的形式是

$$\omega=\omega_0\sqrt{1-v^2/c^2}.$$

虽然这个规则适用于任意的速率，不过，我们取一个速率始终远小于c的例子。于是可以将这个公式写成

$$\omega=\omega_0(1-v^2/2c^2).$$

而时钟的计时速率的亏损量就等于

$$-\omega_0\frac{v^2}{2c^2}. \qquad (6.14)$$

将（6.13）和（6.14）这两项做比较就得出

$$\Delta\omega=\frac{\omega_0}{c^2}\left(gH-\frac{v^2}{2}\right). \qquad (6.15)$$

运动时钟的这种频率变化意味着，假如我们用一个固定不动的时钟测量一段时间间隔dt，那么，运动时钟将记录到这样一个时间间隔

$$dt\left[1+\left(\frac{gH}{c^2}-\frac{v^2}{2c^2}\right)\right]. \qquad (6.16)$$

沿着整条轨迹的时间超出总量等于上式中多出的两项对时间做积分，即

$$\frac{1}{c^2}\int\left(gH-\frac{v^2}{2}\right)dt. \qquad (6.17)$$

这应该就是一个最大值。

gH这一项正好就是引力势φ。我们把整个公式乘上一个常数因子-mc^2看看会有什么结果，其中m是物体的质量。乘上一个常数并不会改变取最大值的条件，而负号只是把最大值变成最小值而已。于是，公式（6.16）表示物体将按照如下条件运动

$$\int\left(\frac{mv^2}{2}-m\phi\right)dt=\text{最小值} \tag{6.18}$$

上式中被积函数只不过是动能与势能之差。如果大家翻阅一下第二卷第19章[16]，就会看到，在讨论最小作用量原理时证明过，在任意势场中，一个物体满足的牛顿定律完全可以按照公式（6.18）的形式写出。

6-9　爱因斯坦的引力理论

运动方程的爱因斯坦形式——在弯曲空间中原时应该达到最大——在低速状态下给出与牛顿定律相同的结果。与卫星沿着大家能够想象出的任何其他路径运动的情形比较，当戈登·库珀做环球航行时，他的手表走得更慢。[17]

因此，引力定律可以用空时几何学的概念以这种不寻常的方式陈述出来。粒子总是取最长的原时——一个在空时中类似于“最短距离”的物理量。这就是在引力场中的运动定律。把这个定律写成这种形式的主要优点是，它不依赖于任何坐标系，也不依赖于确定位置的任何其他方式。

下面来总结一下我们都做了些什么。我给各位讲述了两条引力定律：

（1）有物质存在时，空时的几何结构怎样变化——明确地说就是，用半径超出量表示的曲率正比于球内的质量，参见（6.3）式。

（2）假如只存在引力，物体怎样运动——明确地说就是，物体要按照这样的方式运动，使得它们在两个边界条件之间的原时是最大的。

这两条定律对应于我们早些时候讨论过的两条熟悉的定律。我们原先用牛顿有关万有引力的平方反比律和他的运动定律来描写在引力场中的运动。现在它们被前面写出的定律（1）和定律（2）取代了。这两条新的定律还对应于我们在电动力学中讨论过的定律。我们在那里讨论了由电荷产生的场所满足的规律——麦克斯韦方程组。它描述“空间”的性质如何因带电物质的出现而改变，在引力场的情况下，这是定律（1）所要解决的问题。此外，我们还讨论了有关粒子在给定的场中如何运动的规律——d（mν）/di＝q（E＋ν×B）。在引力场的情况下，这个任务由定律（2）来负责。

大家从定律（1）和定律（2）中知道了爱因斯坦的引力理论的准确的陈述方式——尽管大家通常都会发现，这个理论用一种更复杂的数学形式来陈述。不过，我们还是要做进一步的补充。正如时间的标度在引力场中随着位置而改变那样，长度的标尺也是这样的。当你到处漫游时，尺子就要改变长度。由于空间与时间结合得如此密切，因此，随着时间而发生的事情不可能不以某种方式反映到空间中来。举一个最简单的例子吧：你正飞越地球。在你看来的所谓“时间”，有一部分对我们来说是空间。因此，空间也必定起了变化。其实是整个空时由于物质的存在而被扭曲了，这个变化比只有时间标度的变化要复杂得多。不过，公式（6.3）给出的规则足以完全确定有关引力的所有规律，条件是，关于空间曲率的这个规则理所当然地不仅适用于某一个观测者，而且在所有观测者看来都是正确的。某个飞越一团物质的观测者观测到不同的质量，原因就是他所观测到的该物体掠他而过时的动能，他必须把对应于这个能量的质量算进去。这个理论必须按照这样的方式构造，使得每一个观测者——不管他如何运动——在画出一个球时就会发觉，其半径超出量是$G/3c^2$乘球内的总质量（或者更确切地说是$G/3c^4$乘球内的总能量）。这条定律，即定律（1）在任意运动的参考系中都应该成立，是重要的引力定律之一，叫做爱因斯坦的场方程。另一条重要的定律就是定律（2），即物体必须按照这样的方式运动，使得原时达到最大，叫做爱因斯坦的运动方程。

要把这些定律用完整的代数式写出来，要把它们与牛顿定律做比较，或者要把它们与电动力学联系起来，在数学上是很难的。不过，这正是今天有关引力物理学方面的最完整的定律所要寻找的发展方向。

尽管这些定律在我们考虑过的简单的例子中给出了一个与牛顿力学相一致的结果，但它们并不总是这样的。由爱因斯坦首先推导出的三个偏差值已经在实验上得到证实，它们是：水星的轨道并不是一个固定的椭圆；掠过太阳附近的星光要发生偏折，偏折量等于各位大概会预料到的值的两倍；时钟的快慢依赖于它们在引力场中所处的位置。每当人们发现爱因斯坦的预言与牛顿力学的观念不一致时，大自然就选择了爱因斯坦的预言。

下面总结一下我们讲述过的问题。首先，时间的快慢和距离的大小依赖于进行测量时所处的位置和时刻。这与空时弯曲的说法是等价的。用一个球的实测面积能够确定一个预期的半径$\sqrt{A/4\pi}$，但是，实测半径将会有一个超出量，它正比于球内所含的质量（比例常数是G/c^2）。这个超出量确定了空时弯曲的确切程度。不管谁在观测空间中的物质，也不管这些物质怎样运动，曲率的数值必定是一样的。其次，粒子在这个弯曲的空时中沿“直线”（最大原时的轨迹）运动。这就是爱因斯坦的引力定律的真正含义。

理查德·费曼生平

理查德·费曼于1918年出生于布鲁克林[18]，1942年在普林斯顿获得

博士学位。在第二次世界大战期间，尽管他年纪轻轻，就在洛斯阿拉莫斯的曼哈顿计划中起了重要的作用。战后，他在康奈尔大学和加州理工学院任教。于1965年与朝永振一郎和朱利安·施温格一起获得诺贝尔物理学奖。

费曼博士由于成功地解决了量子电动力学理论方面的问题而获得了诺贝尔奖。他还创立了一个解释液氦中的超流现象的数学理论。此后，又与默里·盖耳曼一起在诸如β衰变等弱相互作用领域从事开创性的工作。在随后的岁月里，费曼提出了高能质子碰撞过程的部分子模型，在夸克理论的发展中起了关键的作用。

除了这些成就之外，费曼博士还在物理学中引入了基础性的新的计算方法和符号，特别是无处不在的费曼图，它——也许比近代科学史上任何其他的形式体系更多地——改变了人们对基本物理过程进行概念化和计算的方式。

费曼是一位卓有成效的教育家。在他所获得的众多的奖项中，他特别欣赏1972年获得的奥斯特教学勋章。1963年初版的费曼《物理学讲义》被《科学美国人》杂志的评论家誉为“难啃的但却营养丰富的美味佳肴。25年之后，它成为教师和大学新生中佼佼者的指南”。为了使广大非专业人士更多地了解物理学，费曼博士还写了《物理定律的特征》与《量子电动力学：光与物质的奇妙理论》。他还写过许多高深的论著，这些都成了研究者和学生的经典参考文献和教科书。

理查德·费曼是一位建设性的公共人物。他在“挑战者”号事故调查委员会中的工作是街知巷闻的，尤其是他证明O形环对寒冷的敏感性的出色的演示，这个精彩的演示需要的只不过是一杯冰水而已。比较鲜为人知的是费曼博士在20世纪60年代为加州的课程委员会劳心费神所做的事情，当时，他对教科书的平庸无奇提出了质疑。

列举理查德·费曼在科学和教育方面的无数成就并不能充分反映这个人物的本性。甚至他最专业的论著的读者也知道，费曼活泼和多面的个性闪耀在他全部的工作中。他不仅是一位物理学家，在不同的时期，他还是收音机修理工、开锁匠、艺术家、舞蹈家、手鼓表演者，甚至还是玛雅象形文字的翻译。他是一个模范的经验主义者，永远对身边的世界感到好奇。

理查德·费曼于1988年2月15日在洛杉矶去世。

[1]戴逊的引文可以分别从他的著作FTOmETOSiOGaia（Pantheonbooks， NewYork，1992）第325页和第314页中找到。

[2]引自相对论领域的开创性文献，由爱因斯坦、洛伦兹、外尔和明可夫斯基合写的《相对论原理》（MethuenandCo.1923年初版）的多佛重印本。

[3]吉本（EdwardGibbon），1737～1794，18世纪英国著名历史学家，《罗马帝国衰亡史》作者。

[4]在排版中，矢量用黑体表示；在手写时则用一个箭头表示：r→。

[5]参见原《物理学讲义》第一卷。

[6]参见原《物理学讲义》第一卷。

[7]参见原《物理学讲义》第一卷。

[8]实际上，由于空气对光的折射率，电子会赢得这场与可见光的比赛。伽马射线则可能会胜出。

[9]参见原《物理学讲义》第一卷。

[10]参见原《物理学讲义》第一卷。

[11]我们应该提一下关于完整性的另外一个要点。假如你想把有关弯曲空间的热板模型扩展到三维，就必须想象，尺子的长度不仅依赖于它所处的位置，而且还依赖于把它放下时它所指的方向。这是尺子的长度依赖于所处的位置这种简单情形的一个推广，不过当指向南北、东西和上下时是相同的。假如你想用具有这种模型的任意几何体系来表示一个三维空间，那么，把它推广是必需的，尽管对于二维而言碰巧没有这种需要。

[12]没有任何人（包括爱因斯坦）知道，如果物质集中在多个点上应该如何处理。

[13]是近似的，原因是密度并非像我们设想的那样与半径无关。

[14]参见原《物理学讲义》。

[15]R.V.POundand G.A.Rebka,JT.，PhySicalReview LeiieTS Vol.4，P.337（1960）.

[16]见原《物理学讲义》。

[17]严格地说，这只是一个局部的最大。我们应该这样来表述：这个原时比任何邻近的路径的原时大。例如，在射得非常高并向下回落的物体的抛物线轨道上的原时，与之相比，在围绕地球的椭圆轨道上，原时就无需更长。

[18]美国纽约市西南部的一个区。——译者注

THE MEANING OF IT ALL

Thoughts of a Citizen-Scientist

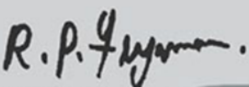
费曼讲演录：

一个平民科学家的思想

Richard P. Feynman

【美】R·P·费曼/著　王文浩/译

R·P·费曼（1918～1988）出生在纽约市的法洛克维，1942年在普林斯顿大学获得博士学位。在第二次世界大战期间，他对发展原子弹做出过重要贡献。战后费曼曾先后在康奈尔大学和加州理工学院教书。1965年，他因量子电动力学方面的研究荣获诺贝尔物理学奖。除了作为一个物理学家外，费曼在不同时期还曾是故事大王、艺术家、鼓手和密码破译专家。





走近费曼丛书

CS | 湖南科学技术出版社

版权信息

费曼讲演录：一个平民科学家的思想

作者：【美】R.P.费曼

ISBN：9787535772435

目录

版权信息
出版者注
1.科学的不确定性
2.价值的不确定性
3.这个不科学的年代
关于理查德·费曼
译后记

出版者注

1963年4月，作为约翰·丹茨（John anz）讲座系列的一部分，理查德·费曼应邀为华盛顿大学（西雅图）做了3次晚间演讲。在此是第一次结集出版。我们衷心感谢卡尔·费曼和米雪·费曼使本书的出版成为可能。

1.科学的不确定性

我想直截了当地就科学对其他领域各种思想的冲击这一主题谈谈我自己的看法，这也是约翰·丹茨先生特别希望探讨的议题。在这个系列讲座的第一讲里，我将讨论科学的本质，特别是要强调其中存在的可疑性和不确定性。在第二讲里，我将讨论科学观点对政治问题特别是对国家的敌人的影响，以及对宗教问题的影响。而在第三讲中，我将描述我是如何看待这个社会的——我想说的是，一个从事科学的人是如何看待这个社会的，但这只是我个人的实际感受——此外我还将谈到未来的科学发现有可能产生什么样的社会问题。

对于宗教和政治我知道些什么呢？你们学校物理系的和其他地方的一些朋友取笑我说："我们也想来听听你讲的啥。我们还从来不知道你对这些问题这么有兴趣。"当然，他们的意思是指我对这些问题感兴趣，但我未必敢说出来。

人们在谈论某一领域中的思想观念对其他领域思想观念的影响时，搞不好就会丢人现眼。在当今这个强调专业化的时代，很少有人能够深入掌握两个不同领域的知识，从而使自己立于不败之地。

今晚我在这里要描述的都是些古老的观念。这些观念差不多早在17世纪就被哲学家们谈论过。那么为什么还要重复讨论这些观念呢？这是因为每天都会有新一代的人出生。因为人类历史上形成的这些伟大观念需要我们特意地、明确地、一代一代地传承下去，否则就会失传。

许多古老的观念已成为常识，没必要再予讨论或解释。但我们环视周围就会发现，那些与科学发展问题相联系的观念则并不是每个人都能正确理解。诚然，很多人都懂科学。特别是在大学里，大部分人都明白科学意味着什么，也许你就是其中之一，本不该来听我絮叨。

要讲清一个领域的观念对另一领域的影响很不容易，我将从我了解的科学现状开始讲起。我确实了解科学，知道它的思想和方法，它对待知识的态度、它进步的动力以及它对心智的训练。因此在这第一讲里，我想谈一谈我所理解的科学。我会把那些较为出格的议论放到下两讲里去，我猜想，届时听众会较少。

科学是指什么呢？这个词通常用来指下述三种情形之一，或是这三种情形的综合。我不认为我们需要说得十分精确——过于精确并不总是一个好主意。有时候，科学是指发现事物的具体方法，有时则是指从所发现的事物中产生出来的知识，最后它还可能是指你发现一事物之后可以做的新东西，或是你创制新事物这一过程本身。这最后一个方面通常称为技术——但如果你读一读《时代》（Time）杂志的科学栏目，你会

发现，约有50%的内容是谈发现了什么新东西，还有50%是谈有什么新东西可以做或正在做。因此科学的通俗定义也包含部分技术内容。

我想按相反的顺序来讨论科学的这三个方面。我将从你可以做的新事物——也就是说，从技术——开始谈起。科学最明显的特征是它的应用特性。科学带来的结果是使我们有能力做许多事情。这种能力的效果几乎用不着多做解释。离开了科学发展，整个工业革命几乎就不可能发生。今天，我们能够生产出供应如此众多人口所需的充足的粮食，能够控制疾病——而所有这些事实都是在不必限制人身自由、不必像奴隶般全力生产的条件下取得的——这些事实之所以成为可能，可以说都是生产手段的科学发展的结果。

但是，这种做事的能力却并不附带如何运用它，是用它来为善还是为恶的说明，因此结果是好是坏全在于如何运用它。我们都乐见改进生产工艺，但由此却带来了自动化的问题；我们都对医学的发展感到满意，但转眼就为新生儿的数量之多感到担忧，担心疾病的灭绝会因此没有人死亡。还有，同样是掌握了细菌知识，有些人则躲在秘密实验室中拼命工作，以期培养出没人能对付的病菌。我们为航空运输业的发展感到高兴，那些大飞机真是令人印象深刻，但我们也意识到空战的恐怖。我们对国家间的通信能力感到欢欣鼓舞，接着却担心容易被监听。我们对人类进入太空感到兴奋不已，但这一领域无疑也将遇到麻烦。所有这些不平衡中，最有名的当属核能的发展以及由此带来的明显问题了。

科学到底有什么价值？

我认为，做事能力总是有价值的，至于结果是好是坏则取决于它如何被运用。但能力本身是有价值的。

我曾在夏威夷被带去参观一座佛教寺庙。在庙里有人对我说，“我要告诉你一个你永远不会忘记的事实。”然后他说，“上帝给了每一个人开启天堂之门的钥匙。这把钥匙也同样能打开地狱之门。”

这句话同样适用于科学。在某种程度上，科学是开启天堂之门的钥匙，但它同样可以打开地狱之门。我们没有得到任何指点来知晓哪个门是通往天堂之门。但为此我们就该把钥匙扔掉，从此放弃进入天堂之门的求索？抑或我们该就什么是运用这把钥匙的最佳方式继续争论？这当然是个非常严肃的问题，但我认为，我们不能就此否认这把天堂之门的钥匙本身的价值。

所有关于社会与科学之间关系的重大问题都在上述讨论的范围之内。当科学家被告知，他必须更多地负起社会责任时，指的往往就是科学的应用方面。如果你从事的是开发核能的工作，你就必须认识到它也可以为害。因此在由科学家进行的这类讨论中，您会预料到这可能是最重要的议题。不过，我不想在此进一步谈论这一点了。我认为将这些问题看做是科学问题显然夸张了。它们更应当看成是人道主义问题。事实

上，如何运用这种能力是明确的，但如何控制它则不那么显然，后者已不属于科学范畴，不是科学家很懂的事情。

让我用一个例子来说明为何我不想谈论这些。前些年，大约在1949年或1950年前后，我在巴西教授物理学。当时有一个所谓“点四”项目，非常令人振奋——每个人都打算去援助欠发达国家。当然这些国家需要的是技术诀窍。

在巴西，我住在里约市。里约的山上有不少由旧招牌拆卸下来的碎木块等搭建的居所，住在这里的人极为贫困。他们没有下水道，也没有水。为了用水，他们得头顶着旧汽油箱下山，到正在盖新楼的建筑工地去取水，因为搅拌水泥要用水。人们将油箱注满水然后再把它们提上山。过后不久，你会看到有水从山上肮脏的污水管流下山来。整个情形非常可怜。

紧挨着这些小山就是科帕卡巴纳海滩上令人心动的建筑群，漂亮的公寓……

我对“点四”项目的朋友说：“这该是个技术方面的问题吧？难道他们就不知道如何修一条水管把水引上山？难道他们就不知道铺设水管到山顶后，至少可以拎着空箱子上山然后把装满脏水的水箱带到山下？”

因此，这不是个技术问题。我们之所以可以肯定，是因为在紧邻的公寓楼里就有管道，有泵。现在我们认识到，这是一个经济援助的问题，但我们不知道这种经济援助是否真的有效。在每座山顶建一条管道和水泵成本是多少？这种问题在我看来似乎不值得在这里讨论。

虽然我们不知道如何解决这个问题，但我要指出，我们已试着做了两件事：技术支持和经济援助。尽管这两方面结果都不是很理想，但我们还会尝试别的东西。正如随后你将看到的，我觉得这一点令人鼓舞。我认为，不断尝试新的解决方案就是解决一切问题的途径。

这些是科学的实际应用方面，也就是你可以做的新的事情。其道理是如此明白，我们没必要继续讨论下去了。

科学的另一个方面是它的内涵，即迄今人类已取得的发现。这是成果，是黄金，是令人振奋的宝藏，是你训练有素的思考和辛勤工作所获得的回报。这种科学工作不以致用为目的，而是为了获得新发现带来的那股兴奋劲儿。也许你们大多数人都了解这一点。但是对那些还不了解这一点的人来说，要让我在一次演讲中就让他领悟到科学的这一重要方面，这种令人兴奋的体验，科学发展的真正动因，几乎是不可能的。不明白这一点的人是没法把握科学实质的。你只有了解并能够鉴赏我们这个时代的这一伟大的激动人心的非凡经历，你才会懂得科学的精髓，才能理解科学与其他事物的关系。你应当明白，科学活动就是一次巨大的探险，一种冲破约束、令人激动的探索，否则你就谈不上生活在这个时代。

你是不是认为这很乏味？其实不是这样。要将科学表达清楚是最困难的，但我也许可以给出一些有关的概念。我们随便找个概念从哪说起都行。

例如，古人认为大地是大象的背，这头大象则站在一头在深不可测的海面上四处游弋的海龟的背上。当然，大海又是靠什么支撑的则是另一个问题。这个问题古人答不上来。

古人的这一信念是想象力的结果。这是一种充满诗意的美好想法。再看看我们今天是怎样看待这一问题的，你会觉得乏味吗？世界是一个转动着的球，整个球面上站满了人，有些人倒立着。我们就像是炉火前的烤肉叉在不停地转动。我们围绕太阳在旋转。这是不是更浪漫，更令人兴奋？那么是什么支撑着我们不掉下去呢？是引力。引力不只是地球上才有的东西，而且是使地球从一开始就成为球状，使太阳不至于分崩离析，使地球围着太阳运行永远不会脱离轨道的东西。引力不仅支配着恒星，而且支配着恒星之间的关系，无论多远，无论在什么方向上，它都能让它们在巨大的星系里各就其位。

已经有很多人描述过我们这个宇宙，而且还将继续描述下去。宇宙未知的边缘就像前面诗情画意般描述的深不可测的大海的海底——一样的神秘，一样的给人以启迪，也一样的不完整。

但是，大自然的想象力之雄阔远非人类可比。没有人能够想象出大自然会是如此壮美，如果他没有通过观测对此有所了解的话。

再譬如地球和时间。想必你已经通过诗人的描写了解了什么是时间，但那种时间概念怎可与真实时间——那种漫长的演化过程——的内容之丰富相比？哦，也许我说得太快了点。这么说吧，起先，地球上没有任何生命活动。几十亿年间，这颗星球就这么旋转着，日升日落，波涛翻滚，大海的喧嚣没有任何活物来欣赏。你能想象出，或是能品味或设想一个没有生命的世界会有什么意义吗？我们都习惯于从生命角度来看世界，这使我们无法理解没有生命将意味着什么，可是在相当长的时间里，这个世界就是在没有生命的情形下度过的。而且在宇宙中的大部分地方，今天仍是什么生命都没有。

就拿生命本身来说，生命的内部机制和各部分的化学组成是十分完美的。业已证明，所有生命都是与其他生命相互关联着的。叶绿素是植物进行氧处理过程的重要的化学物质。它具有正方形结构，这种漂亮的环结构称为苯环。与植物相去甚远是像我们人这样的动物，而在我们人体的含氧系统即血液中，血红蛋白也具有同样有趣而奇异的正方形环结构。只不过环的中心是铁原子而不是镁原子，因此它们不是绿色而是红色的，但它们的环结构完全相同。

细菌的蛋白质和人体的蛋白质是相同的。事实上，最近发现，细菌制造蛋白质的机制可以接受来自红细胞物质发出的指令来产生血红蛋

白。各种生命形式之间就是这样接近！生物在深层次化学结构上的这种共性确实非常神奇而完美。但长期以来我们人类却一直骄傲得甚至看不到我们与其他动物之间的这种亲缘关系。

再说说原子。那叫一个漂亮——晶体里以某种模式重复排列的小球可以延绵数英里长。看上去宁静不动的东西，比如盖着盖子的玻璃杯里的水，可以放在那里好几天，但其实是无时无刻不在运动。原子脱离液面，又反弹回水里。在我们肉眼看起来平静的现象实则充满了混乱和剧烈的运动。

还有，也已发现，整个世界都是由相同的原子组成的，恒星的组成也和我们一样。这就带来了一个问题：这些物质来自何处？这里不是说生命来自何处，也不是说地球来自何处，而是要追问形成生命和地球的物质来自何处。看起来好像可以认为，它们来自某些恒星爆炸喷射出的碎片，就像我们今天看到的恒星爆炸时的情形一样。这些碎片在4.5亿年的时间长河里不断演化着，最后变成现在这样：一奇异的生物拿着器具站在这里对着号称听众的奇异的生物进行宣讲。世界够奇妙吧！

我们再以人类生理学为例。其实我说什么区别都不大。如果您看事情足够仔细，你会看到，没有任何东西能比科学家经过艰苦努力发现的真理更令人振奋的了。

在生理学里，你可以设想一下泵血过程。女孩子在做剧烈的跳绳运动时，体内会发生什么变化呢？血被泵出，交错连接的神经系统会很快将肌肉神经的反应回馈至大脑，说，“现在我们已经触及地面，赶紧提高血压，否则就要伤到脚后跟了。”当女孩上下跳跃时，还有另一组肌肉系统在工作，与之相连的另一组神经在数数：“一，二，三，奥利里，一，二，……”她在做这些的同时，也许还在对看着她的生理学教授微笑。这也是泵血和肌肉神经反应的过程！

然后再说说电。正电与负电之间的吸引力是如此强大，以至于在所有正常物质中，全部正电与全部负电达到精确的平衡，每种电荷都紧拉着另一种电荷。在很长一段时间里，甚至没有人注意到电现象，只是在摩擦琥珀后发现它能吸起纸片。然而今天，我们在摆弄这些东西时发现，这里头还真有大量机理存在着。可惜这些科学机理还不能彻底被欣赏。

举个例子，我读过法拉第的《蜡烛的化学史》，一本根据他前后6次为青少年做的圣诞节讲座编成的书。法拉第演讲的要点是，不管你观察什么，只要你观察得足够仔细，你就会涉及整个宇宙。由此，他通过观察蜡烛的每一个特点，搞懂了燃烧、化学等。但这本书的序言在描述法拉第的一生和他的一些发现时却解释说，法拉第发现，化学物质电解时所必需的电量与被电解的原子数和电离价之积成正比。这篇序言还进一步解释说，他所发现的原理今天已应用于镀铬和铝阳极氧化着色，以及其他数十项工业应用中。我不喜欢这种陈述。我们还是来听听法拉第

自己是怎么论述他的发现的："物质的原子以某种方式被赋予电性或与电能相关联，并因此显露出它们最显著的特性，其中就包括它们相互间的化学亲和力。"法拉第发现了使原子如何结合在一起的东西，这个东西也决定着铁和氧的结合并由此形成氧化铁，其中一些带正电，另一些带负电，它们按一定的比例彼此吸引。他还发现，原子中的电荷是按单位出现的。这两者都是重要的发现，但最令人兴奋的是，这两个发现成了科学史上最富戏剧性的罕见时刻之一：两大领域走到一起，得到统一。法拉第突然发现，表面上两个明显不同的两件事情实则为同一件事情的不同方面。有人研究电学，有人研究化学。突然人们发现它们是同一件事情——电性力导致化学变化——的两个方面。今天人们仍然是这么理解的。因此，单说这些原理仅被用在镀铬上是不可原谅的。

正如你们知道的那样，生理学上一有新发现，报纸就会以标准的字句刊出："发现者说，这项发现有可能用于治疗癌症。"但报纸却不能说明这项发现本身的价值。

试图理解大自然的运作方式是对人类的推理能力的最大考验。它涉及许多奇技妙想。你必须走过逻辑的美丽索道来避免在对将要发生的事情进行预测时出错。量子力学和相对论的一些概念就是这方面的例子。

这一讲的第三个方面是谈科学作为发现的方法。这个方法是基于这样一条原则：观察是判断某种东西是否存在的判官。如果我们认识到观察是一个概念的真理性的最终判据，那么科学上的所有其他方面和特征就都可以直接得到理解。但是，这里所用的"证明"其真正含义是"检验"，就如同100度的酒，这里100度是对标准酒精含量的一种检验。对当今的人来说，这个概念应该被解释为"通过例外情形来检验法则。"或者换一种说法，叫"用例外情形来证明该法则是错的。"这是一条科学原理。就是说，如果某项法则出现了一个例外，而这个例外又能够通过观察得到证实，那么该法则就是错的。

任何法则的例外情形本身是最有趣的，因为它向我们表明旧的法则是错的。于是最令人兴奋的事情就是去寻找什么是正确的法则，如果这种正确法则存在的话。人们通常在能够产生类似结果的其他条件下来研究例外情形。科学家总是试图找出更多的例外情形，并确定这些例外的特性，这是一个随着研究进展能给人带来持续不断的兴奋的过程。科学家不会设法掩饰既定法则的错误，实际情形正好相反，找出例外才会带来进展和兴奋。科学家总是试图尽快证明自己错了。

以观察为判决者这一原则为哪些是能够回答的问题施加了一道严格的限定。这些问题只限于如下情形，你可以这样问："如果我这样做，会有什么结果？"可以有好些方法用来尝试。而像"我该这么做吗？"或者"这么做值吗？"这样的问题就都不属于这种情形。

但如果一件事情不是科学性质的，如果它不能通过观察得到检验，这并不意味着它是死路一条，是错的，或是愚蠢的。我们不是要证明科

学的就是好的，其他的都不好。科学家研究所有通过观察可以分析的事情，因此能称为科学的事情都能够被发现。但是那些无法通过观察来分析的事情则排除在外。这并不是说这样的事情不重要。事实上，它们在许多方面非常重要。例如在决定采取行动前，你必须下定决心，因此总会涉及“应当”的问题，这个问题就不能单独用“如果我这样做，会有什么结果？”的方式得到答案。你会说，“当然可以，你看到会发生什么，然后决定是否让它发生。”但是这一步正是科学家无能为力的。您可以搞定会发生什么，但你必须决定你是否希望这样的结果。

遵循以观察作为判定依据这一原则进行的科学研究会带来一系列技术上的结果。例如，观察不能太粗糙。你必须非常小心。仪器里可能有一些沾上灰尘的地方，从而使观察对象的颜色发生变化；而这是你不曾预想到的。你必须非常仔细地检查观察条件，完了之后还须复查，以确保你掌握所有条件，并且不会发生误解。

有意思的是，这种彻底性，尽管是一种美德，往往还是会被误解。当有人说某件事已经得到了科学处理时，他的意思往往是这件事得到了彻底处理。我听到有人说德国对犹太人的灭绝进行得很“科学”，其实这与科学一点都不沾边，只不过是强调进行得很彻底。因为这其中不涉及先进行观察然后检查结果从而确定事情的问题。如果按照这种理解，那么早在科学远不像今天这么发达，观察也不像今天这么受重视的古罗马时代和其他时期，就已经有这种“科学”的大屠杀存在了。因此在这种情况下，人们应该用“彻底”或“彻彻底底”而不是用“科学”来修饰。

如何进行观察有许多专门技术，常说的所谓科学哲学就是讨论这些技术问题的。对观察结果进行解释就是其中的一个例子。例如有个很著名的笑话是说一个男人向他的朋友抱怨说，他发现了一个神秘的现象：他农场里的白马要比黑马吃得多。为此他很担心，而且对此感到不解。后来他的朋友提醒他，可能他养的白马要比黑马多。

这听上去有些可笑，但想想我们在进行各种判断时有多少次犯下了类似的错误。你说“我姐姐得了感冒，并在两周内……”，其实你想一想，这是不是也是这样一种情形。科学推理需要一定的训练，我们应该开设这种训练，因为在今天即使是最低级的这类错误也是不必要的。

科学的另一个重要特点是它的客观性。客观地审视观察结果是非常必要的，因为作为实验者你可能会偏爱某些结果。您做了几轮实验，但由于存在各种不确定性，譬如落有灰尘，因此每次结果都会不一样。你不可能控制一切条件。但你希望出现某种特定的结果，因此当这种结果出现时，你就会说，“看见吧，就是这结果。”你再做一遍实验，结果不同。那是因为你前面的实验也许受到污染，但你忽略了它。

这些事情似乎显而易见，但人们在确定科学问题或跟科学沾点边的问题时却对此没有给予足够的重视。例如，在你分析股票涨跌是不是因为总统说过或没说什么的问题时，就可能是这种情形。

另一个非常重要的技术性要点是，法则越具体就越有趣。理论陈述得越明确，就越有兴趣得到检验。如果有人提出说，行星之所以围绕太阳转，是因为所有的行星物质都有一种运动倾向，一种变动不居的特性，我们把它叫做“活力劲儿（oomph）”。这个理论也可以解释其他一些现象，因此是一个好的理论，是不是？不，与行星绕日运行是因为受到向心力的作用，这种向心力的大小反比于到中心距离的平方这样的命题相比，前者可以说是一无是处。第二个理论之所以较好，是因为它很具体，很明显这绝非偶然。它说的如此明确，以至于只要运动出现一丁点误差就可以判明其对错，除此之外这些行星可以随意摆动。但根据第一种理论，对这种摆动则解释成，“嗯，‘活力劲儿’的行为是有点古怪。”

因此，法则越具体，其威力就越强大，同时也就越容易出现例外情形，因而也就越有趣，越值得检验。

语词可以变得毫无内容。如果一堆语词像“活力劲儿”例子那样堆砌起来，我们从中得不到任何明确的结论，那么，这些语词构成的命题就几乎毫无意义可言，因为你根据该事物具有好动的秉性这一断言就可以解释几乎任何事情。哲学家对此有过很多论述，他们说每个词必须有非常准确的定义。其实我不太同意这个观点。我认为极端精确的定义通常是不值得的，有时是不可能的——实际上大多数情况下都是不可能的，但在这里我不想就这个问题继续讨论下去。

许多哲学家在谈到有关科学的问题时，大多数内容其实是关于如何确保某种科学方法行之有效这样的技术层面的问题。至于这些技术要点是不是适用于不以观察作为判据的领域就不得而知了。我不会说任何事情都要用观察检验的方法来判定。在不同的领域，斟词酌句或法则的具体性等也许并不是这么重要。我说不好。

在上面所谈的内容里，有很重要的一点我没谈到。我说观察是一个概念是否含有真理的判决者，但这个概念从何而来的呢？科学的快速进步和发展要求人类发明出一些东西用以检验。

在中世纪，人们认为只要多做观察，观察结果本身就会产生出法则。但这种做法并不有效。在这里想象力更为重要。因此接下来，我们要谈的是新概念从何而来。实际上，重要的是要有新概念，至于它们从何而来并不重要。我们有办法检验一个概念是否正确，这与它来自何方不相干。我们只管检查它是否与观察结果相抵触。因此在科学上，我们对一个概念是怎么产生的并不感兴趣。

不存在决定什么是好概念的权威。我们早已不需要通过权威来确定一个概念的正确与否。我们可以参考权威的意见，请他提出某些建议。然后我们可以尝试这些建议，看看它们是不是正确。如果不正确，甚至更糟糕——那么，“权威”也就失去了其“权威”。

起初科学家之间的关系充满争执，因为他们属于一群最能辩的人。

例如，早期物理学就是这种情形。但今天物理学界里的关系则非常好。科学论战可能会充满着笑声，争论双方都有不确定性，双方都在构思实验并打赌说会出现什么结果。在物理学里，积累的观测数据是如此丰富，你几乎不可能想出什么新概念，它既不同于此前已有的概念，又能够与现有的所有观察结果相一致。因此，如果你从什么地方的什么人那里得到了新东西，你只会高兴，不会争论说为什么其他人说什么什么的。

许多学科还没有发展到这一步，而是有点类似于物理学初期的情形，当时有很多争论，因为没有那么多观察结果可凭据。我提出这一点是因为这是一个有趣的现象：人与人之间的关系，如果有一套独立的检验真理的方式，就会变得不那么争论不休。

大多数人都觉得奇怪，在科学上，人们并不关心某个概念提出者的背景，或他提出这一概念的动机。你只需要听，如果这个点子听起来值得一试，而且可以一试，它与众不同，却并不明显与以前的观察结果相抵触，那么它就会令人兴奋并值得去试。你不必在意他研究了多久，为什么他会找到你来讨论。从这个意义上说，这个想法出自何处无关紧要。它们的真正源头是未知数，我们称之为人类大脑的想象力，一种创造性的想象力——要说它是已知的，那它就是一种“活力”。

令人惊讶的是人们不相信科学研究中存在想象力。这是一种非常有趣的想象力，它不同于艺术家的想象力。发挥这种想象力最难的是你要构想出一种你从来没有见过的东西，它的每一个细节都与已有的东西相一致，但它本身则与所有已能想到的不同。此外，它必须非常明确，而不是一个模糊的命题。这确实困难。

顺便说一句，我们有各种可进行检验的法则这本身就是个奇迹。有可能找到一条法则，如万有引力的平方反比律，就是某种奇迹。我们对这条法则可能并不完全知其所以然，但它能提供预测的可能性——这意味着它能告诉你在你还没进行的实验中你能预期会发现什么。

有趣的是，同时也是绝对不可或缺的是，各种科学法则之间是相互一致的。由于观测结果具有同一性，因此对同一个现象不可能出现一条法则预言的是这种结果，而另一条法则预言的则是另一种结果。因此，科学不是某个专家的专利，它完全是普适的。我在生理学中讨论原子，在天文学、电学和化学里也讨论原子。它们都具有普适性，都必须相互一致。你不能用不能由原子构成的新事物来作为开端。

有趣的还有，推理在猜测法则的过程中很有用，各种法则，至少在物理学里是这样，会因此变得减少。我在前面给了将化学里的一条法则和电学里的一条法则合而为一的例子，这是减少法则的一个很好的例证。但还有更多的例子。

描述自然的法则似乎都具有数学形式。这不是以观察结果作为判据

的结果，也不是科学所必需的一种特性。而只是表明，至少在物理学领域是这样，你可以将定律写成数学形式，这样会具有强大的预测能力。至于大自然为什么是数学的，同样也是一个未解之谜。

现在我要谈一个重要问题，那就是旧有的定律可能是错的。观察怎么会不正确呢？如果它已得到仔细检查，结论又怎么会不对呢？为什么物理学家总在变更定律呢？答案是，第一，定律不是观察结果；第二，实验总是不精确的。定律都是猜中的规律和推断，而不是观察所坚持的东西。它们只是好的猜想，到目前为止一直都能通过观察检验这副筛子。但后来知道，眼下的这副筛子的网眼要比以前使用的更小，于是这条定律就过不去了。因此说，定律都是猜测出来的，是对未知事物的一种推断。你不知道会发生什么事情，所以你需要猜测。

例如，我们一度曾认为——人们发现——运动不会影响到物体的重量，就是说，如果你旋转一个陀螺并称量它，然后在它停止后再称量它，结果称出来的重量相同。这是一个观察的结果。但是你不可能将物体重量精确到小数点后无限多位，譬如十亿分之一。但现在我们知道，旋转的陀螺要比静止的陀螺重不到十亿分之一。如果陀螺旋转得足够快，使得边缘速度接近每秒186000英里（即光速——译注），那么重量增加的就很可观了——但现在我们还做不到这一点。第一次对比实验是陀螺的速度远低于每秒186000英里的条件下进行的。转动的和静止的陀螺质量读出来都一样，于是人们猜想，质量不随运动状态而变化。

多么愚蠢！真是一个傻瓜！这只是一种猜测，一种外推。他怎么会做出如此不科学的事情来？其实这里无所谓不科学，只是不确定。不做猜测那才真叫不科学呢。人们一定会这么做，因为在这里推断是唯一真正有价值的事情。只有面对尚未有人尝试过的局面来预言将会发生什么事情，才值得去做。如果你能告诉我的只是昨天发生的事情，这种知识没有什么真正的价值。有用的知识必须是，如果你做了一些事情，就能告诉我明天会发生什么——这不仅必要，而且也很好玩。只是你必须愿意承担出错的风险。

每一条科学定律，每一条科学原理，每一项观察结果的陈述都是某种形式的删繁就简的概述，因为任何事情都不可能得到准确的描述。上述那位猜测者只是忘了——他本该这样来陈述定律：“只要物体的速度不是太大，物体的质量就不会有明显变化。”这种游戏就是先制定明确的法则，然后再看它是否能通过观察之筛。因此，这里具体的猜测是，质量从不改变。多么令人兴奋的可能性！不管实际情形是不是如此，它都没有害处，只是不确定。而不确定性并不造成损害。提出一种猜测尽管不确定但总比什么都不说要好。

有必要指出，实际情形也确实是这样，我们在科学研究中所说的一切，所得出的所有结论，都具有不确定性，因为它们只是结论。它们是关于会发生什么事情的猜测。你不可能知道会发生什么，因为你不可能进行最完备的实验。

奇怪的是，旋转陀螺的质量效应是如此之小，你可能会说，“哦，这没什么区别呀。”但是为了得到一项正确的法则，或者至少是为了能够通过不断出现的筛子，就需要进行更多的观察，需要非凡的智慧和想象力，还需要对我们的哲学、我们对空间和时间的理解进行彻底的更新。我指的是相对论。事情往往就是这样，一旦出现些微的效应，就需要对现有概念进行极具革命性的修正。

因此，科学家已习惯于对付存疑和不确定性。所有的科学知识都是不确定的。这种与怀疑和不确定性打交道的经验很重要。我相信它具有非常大的价值，并且能够应用于科学以外的领域。我相信，要解决任何过去一直悬而未决的难题，你必须让通向未知领域的大门敞开。你必须允许出现可能不完全正确的情形。否则，如果你已经心有成见，就很可能解决不了这个问题。

当科学家告诉你他不知道答案，说明他对这个问题还不清楚。当他告诉你他预感到应当如何去着手工作时，表明他对问题的解决还不是很确定。当他可以肯定事情是怎样进行的，并告诉你，“我敢打赌，这么做肯定行”的时候，表明他仍然有一些疑问。而且最重要的是，为了取得进展，我们必须容许这种无知和疑虑。正因为我们心存疑虑，我们才会在新的方向上探求新的设想。科学发展的速度不取决于你取得观察结果的速度，更重要的是看你创建用于检验的新东西的速度。

如果我们不能够或不希望从新的方向看问题，如果我们没有疑问或承认无知，我们就不会产生任何新的想法。那样的话也就没有什么值得检验了，因为我们知道什么是对的。因此，我们今天称之为科学的东西是一套对确定性程度各不相同的知识的陈述。其中有些知识最不确定，有些几乎可以肯定，但没有一个是绝对肯定的。科学家对此已经习以为常。我们知道，人都能生活在这个世上并且对很多事情并不知情，二者间并无矛盾。有人会说：“你啥都不知道怎么可能活着？”我不知道他们的意思。我永远是活在很多东西都不知道的状态中。这很容易。你怎么知道我想知道啥。

在科学上允许有这种怀疑的自由是非常重要的，而且我相信在其他领域也是如此。它是斗争的产物。这是为获准怀疑、为容许存在不确定而进行的斗争。我不希望我们忘记这种斗争的重要性，默认事情就这么发展下去而无所作为。作为一个懂得一种可以接受的无知哲学的巨大价值，知道这种哲学有可能带来进步，一种作为思想自由产物的进步的科学家，我感到有一种责任。我有责任宣扬这种自由的价值，并告诫人们：怀疑不可怕，而应予欢迎，把它当做人类一种新的潜在的可能性来欢迎。如果你知道你还不能确定，你就有机会来改善这种局面。我要为后代争取这种自由。

在科学上，怀疑精神具有明显的价值。在其他领域是不是这样我不敢说，这是个不确定的问题。我期望在下两讲里重点讨论这个问题，我将试图证明，怀疑精神很重要，怀疑不是件可怕的事情，而是具有十分

重要的价值。

2.价值的不确定性

当我们想到人类似乎具有各种奇妙的潜力，而我们取得的成就与之相比却显得那么渺小，我们都会感到失落。我们一而再，再而三地认为我们可以做得更好。生活在过去各个时代的噩梦里的人们，对未来寄予梦想，我们，作为他们所梦想的未来，虽然在很多方面已经超越了那些梦想，但在很大程度上依然做着同样的梦。今天我们对未来所抱的希望在很大程度上与过去他们对未来所怀的梦想是一样的。人们一度曾认为，人的潜力没得到充分发展是因为每个人都很无知，解决这个问题的出路在教育，如果所有人都受到良好的教育，那么人人都可能成为伏尔泰。但事实表明，学会作假和作恶与学好一样容易。教育是一种强大的力量，但它既可以被用作学好，也可以被用来教人使坏。我曾听人说，国家间的信息交流应当能够增进相互了解，从而成为发展人的潜能的途径。但是通信渠道可以开通也可以关闭。传播的可以是谎言也可以是真理，可以是宣传也可以是真实的、有价值的信息。通信是一种强大的力量，但它同样既可以为善也可以为恶。曾几何时，应用科学被认为至少可以将人从物质困难中解救出来，历史也确实记录了某些好的方面，特别是在医学领域。但另一方面，有些科学家则躲在秘密实验室里小心翼翼地开发某些可怕的病毒。

每个人都厌恶战争。今天，我们的梦想是通过和平手段来解决问题。如果没有军备开支，我们可以做任何我们想做的事情。但和平也是一种可以为善也可以为恶的强大力量。和平怎么为恶？我不知道。但如果有一天我们得到了和平，我们就会看到这种情形。显然，我们将和平视为一种强大的力量，同样，物质力量、通讯、教育、诚实和许多梦想家的理想也都是这样的强大力量。与古人相比，我们今天有更多的力量需要控制。也许我们在这方面做得比大多数前人能做到的要好一些。但比起我们目前取得的好坏不分的成就，我们理应能够取得的似乎还应当多得多。为什么会这样呢？为什么我们不能战胜自己？因为我们发现，即使是最伟大的力量和能力，似乎也没有附带任何明确指出该如何运用它们的说明。譬如，我们积累下的关于物理世界行为的大量知识只是让人确信，这种积累缺少一种内在的价值意义。科学并不直接告诉我们好和坏。

古往今来的各个时代，人们一直试图弄清楚生命的意义。他们意识到，如果能为人类的总体发展，为我们的行动指明某个方向，赋予一定的意义，那么人类将显示出巨大的力量。因此，对于人类一切活动的意义这个问题，曾有过很多很多的答案。但所有这些答案都各不相同，难以调和。一种思想的支持者看到另一种信仰的信徒们在积极行动就会感到恐惧——因为从他们的观点来看，人类所有的潜力都被引向了虚假的、受限的死胡同。事实上，哲学家们正是从历史上出现的这种虚伪信念带来的巨大灾难中认识到人类所具有的神奇潜质和惊人能力。

人类的梦想是要找到一条公开、开放的通道。那么，所有这一切有什么意义呢？对于如何驱除笼罩在存在之上的神秘感，今天我们能说什么呢？纵观人类的一切知识，不仅是古人所了解的那些，而且包括他们不了解而我们今天已经发现的所有知识，我认为我们必须坦率地承认，我们还很无知。但是我认为，承认了这一点，我们可能就已找到了这条开放的通道。

承认我们无知，永远保持“我们不知道应朝哪个方向走”这样一种态度，我们就留有了更改、思考的可能性，留有了对发展方向问题做出新贡献和新发现的可能性，尽管我们还不知道我们想要什么。

回顾历史上最糟糕的那些时期，我们几乎总能发现，这些时期总有一群对某些东西绝对信仰、十分教条的人。他们对于所信仰的东西是如此严肃认真，以至于坚持认为世界上其余的人都应当认同他们。为了坚持他们宣扬的真理性，他们会做出直接违背自己信仰的事情来。

在上一讲里我已谈到，这里我还想重申的是，我们只有容许无知，容许不确定性，我们才有希望让人类沿着不受限制、不会永远被阻塞的方向上持续前进，而不再复现人类历史上多次发生过的情形。我要说我们不知道什么是生命的意义，什么是正确的道德价值观，我们没有办法选择它们，等等。对于道德价值，对生命的意义等这些问题的讨论，只有追溯到道德体系和意义描述的广大源头，即深入到宗教领域，才能进行。

因此我认为，要能够在三次讲座里讲清楚科学思想对其他领域思想的冲击这一主题，就必须对科学与宗教的关系进行坦率、充分的讨论。我不知道为什么我甚至要为这么做找个理由，因此接下来我不会继续作这样的解释了。不过，我还是想从讨论科学与宗教之间的冲突问题开始。我已经大致描述过科学是指什么，现在我要告诉你我所说的宗教是指什么。宗教这个问题要说清楚非常困难，因为不同的人有不同的理解。但在这里，即我要展开的讨论里，我是指日常的、普通的、去教堂做礼拜的那种宗教，不是宗教的那种优雅的神学，而是指普通民众对宗教信仰的较为传统的理解。

我坚信，科学与宗教之间是存在冲突的，这里宗教基本上是按上面那样的定义所指。为了使讨论变得容易，使事情变得非常明确，而不是变成一种非常困难的神学研究，我将提出一个在我看来时有发生的问题。

比方说，一个来自宗教家庭的年轻人上大学，学的是科学。学习科学的结果，自然不免会对事物产生质疑。因此，他先是开始怀疑，然后开始不信仰他父亲所信奉的上帝。这里的“上帝”，我是指那种人格化的上帝，那种做礼拜时向之祈祷、与创世有关联的上帝，也许，还是人们祈求道德价值时所面对的那个上帝。这种现象经常发生。这不是一个孤立的或想象的情况。事实上，我相信，尽管我没有直接统计，有超过一

半的科学家不信仰他们父辈的上帝或传统意义上的上帝。大多数科学家不信教。为什么？到底发生了什么？通过回答这个问题，我认为我们将能够搞清楚宗教和科学的关系问题。

那这是什么原因呢？这有三种可能。第一，这个年轻人师从的是一位科学家，我已经指出，他们是无神论者，因此他们的罪恶不断地传播给了学生……谢谢（你们的笑声）。如果你也持这个观点，我认为这表明你知道的科学还不如我知道的宗教多。

第二种可能是，因为半瓶子醋最危险了，而这个年轻人刚学了一点点科学就认为他全都知道了。因此人们认为，当他变得更成熟之后，他会较好地理解这些事情。但是我不这么认为。我认为有许多成熟的科学家，或自认为成熟的人——也就是如果你事先不了解他们的宗教信仰，你会认为他们很成熟的那种人——并不信奉上帝。事实上，我认为答案正好相反：他并非知道了一切，而是突然意识到自己并非知道一切。

对这一现象解释的第三种可能是，年轻人也许没能正确理解科学，科学并不能否定上帝的存在，信仰科学和信奉宗教并无矛盾。我同意科学不能否定上帝的存在。我绝对同意。我也同意信仰科学和信奉宗教是并行不悖的。我知道很多科学家都信奉上帝。我的目的并不是要否定什么。很多科学家信奉上帝的方式甚至还非常传统，也许我不确切知道他们是如何信奉上帝的。但他们对上帝的信仰和在科学的行为完全并行不悖。这种一致性做到了，但做起来并不容易。我在这里要讨论的是，为什么达到这种一致性会非常困难，以及值不值得尝试去实现这种一致性。

我认为，当这个年轻人学习科学后，他所面临的困难有两个来源。首先，他学会了质疑，认为遇事有必要质疑，懂得了质疑的可贵之处。于是，他开始怀疑一切。在这之前，问题可能是“上帝究竟存不存在”，现在问题变成了“我在多大程度能确信上帝的存在？”现在他面临一个新的不同于以往的棘手问题。他必须确定他能确信到什么程度，他处在了两个极端之间：一端是绝对肯定，另一端是绝对否定。他的信仰位于什么位置呢？由此他意识到他的知识只能是不确定条件下的知识，他再也不能绝对确信任何事情了。他必须拿定主意：到底是一半对一半呢还是有97%的把握？听起来这个差别不大，但它非常重要，也非常微妙。当然，一般来说，人们不会一开始就怀疑上帝的存在。通常他会从怀疑信仰的某些细节开始，譬如说是否有来世，耶稣生平的具体问题等。为了使这一问题尽量突出，说得更加直白，我将予以简化，直接提出这样的问题：上帝到底存不存在。

这种自我反省或思考——随你怎么看吧——的结果，往往是要么非常接近于肯定：存在上帝；要么是另一极端：几乎可以肯定“存在上帝”是错误的。

这个学生学习了科学之后还会遇到第二个困难，就是说他会在一定

程度上感受到科学与宗教之间的冲突，这是受到两种教育的人必然会遇到的困难。虽然我们可以在神学和高层次哲学层面上论证说这二者间没有冲突，但事实上，来自宗教家庭的这位年轻人在学习科学时还是会与自己、与他的朋友产生争论，这也是一种冲突。

冲突的第二个来源与他学习科学有关，或更谨慎地说，与他学习科学有部分关系。例如，他通过学习知道了宇宙的大小。宇宙之大令人印象非常深刻：我们不过是生活在一个围绕太阳旋转的微小颗粒上。而这个太阳又不过是我们所在的这个星系中数百亿个太阳中的一个，而我们这个星系则又是宇宙中数十亿个星系中的一个。又譬如，他懂得了人与动物之间亲密的生物学关系，懂得了一种生命形式与另一种生命形式之间的亲密关系，懂得了人不过是这一绵长宏大的进化过程中的后来者。难道其余的都只是为他的诞生而搭起的平台？另外还有原子。我们现存的一切似乎都是由它按不可改变的规律构造的，没有任何东西可以例外。恒星的构造是这样，动物的构造也同样——只是更为复杂，活得似乎很神秘。

思考人类活动之外的宇宙，想像没有人的话它会是个什么样子，是一种伟大的探险。其实宇宙在其漫长历史中的大部分时间里，在绝大多数地方正是这种情形。当他终于有了这种客观视角，物质的神秘性及其至高无上的地位也就得到了充分理解。然后他再用这种客观的眼光回头审视作为物质的人类就会看出，生命只是宇宙极为深奥的神秘的一部分，这是一种非常罕见、非常令人兴奋的体验。最后，当他想到，试图理解宇宙中的人这个原子到底是什么的努力显得那么徒劳，人这个东西——一群充满好奇的原子——反观自身并且惊奇为什么会对事情充满好奇时，他会感到哑然失笑。最后，这些科学观点走向敬畏和神秘的终点，消失在不确定性的边缘，但它们似乎是如此之深刻，如此令人难忘，以至于使得“所有这一切都是上帝安排好的用来观看人类为善恶争斗的看台”的论调显得不够充分。

有人会告诉我，我刚才所描述的恰是一种宗教体验。好吧，随你怎么称呼都可以。接下来我要说，就算是一种宗教体验，那么这个年轻人的宗教体验使他发现，他所信奉的信仰不足以描述或涵盖这样一种体验。他信奉的上帝不够强大。

或许吧。每个人都可以有不同的意见。然而，假若这位学生得出的结论是个体的祷告确实到达不了上帝那里。我不是要证伪上帝的存在，而只是想让你明白受到两种不同观点教育的人的困难所在。据我所知，我们不可能否定上帝的存在。但不可否认的是，同时接受两种不同的观点是非常困难的。因此，假定这个学生在这方面特别碰到困难，他得出的结论就是个人的祈祷上帝不可能听到，那将会发生什么事？于是一种怀疑机制，就是他的疑惑，会转向伦理问题。因为，按他过去受到的教育，他的宗教观已认定，上帝的话就是伦理道德价值的标准。现在，如果上帝也许不存在，那么这种伦理道德价值观念就有可能是错的。但非常有意思的是，人类的这些伦理道德价值观念却几乎完好无损地延续下

来。可能某个时期他所信奉的宗教的某些道德观点和伦理立场看来有错，他必须好好思量，但其中许多他都会遵奉不悖。

但是在我看来，我的那些持无神论观点的科学界的同事——不是指所有科学家，我不可能从他们的行为中判断出他们与持有神论观点的同事相比是否具有特别不同之处，因为我自己也身在其中——如道德情感、他们对其他人的理解、他们的人性关怀等，既适用于有宗教信仰者也适用于无神论者。在我看来，伦理道德观点和宇宙运行的理论之间是相互独立的。

科学确实对与宗教有关的许多观念造成了冲击，但我不相信它会非常强烈地影响到人们的道德行为和伦理观念。宗教有许多方面。它回答了各种问题。不过我在此要强调的是如下三个方面。

第一个方面，是它告诉了我们万物是什么，它们来自何处，人是什么，上帝是什么以及上帝有什么特性等。就这里的讨论而言，我想将这些称之为宗教的形而上的方面。

接着宗教告诉我们如何做人。我这里不是指那种在宗教典礼或仪式上的行为规范等，而是指一般意义上做人的道德方式。我们可将它称为宗教的伦理方面。

最后，人是脆弱的。需要具有正确的良知才能确保产生正当的行为。尽管你知道你该怎么做，但你同样清楚地知道不可能随心所欲地做事。宗教强有力的一个方面正是它的灵感作用。宗教激励人行为端正。不仅如此，它还激发起艺术和人类许多其他方面活动的灵感。

现在，从宗教看来，宗教的这三个方面是非常紧密地相互联系的。首先，事情通常是这样的：上帝的话就是道德价值标准；其次，上帝的话将宗教的道德伦理和形而上的方面联系起来；最后，上帝的话会激发起灵感，因为如果你是在为上帝服务，服从上帝的旨意，你就会以某种方式通达宇宙，你的行为就会在更大的世界上显示出其意义，而这正是灵感的方面。因此，这三个方面是高度整体性的，是相互关联的。困难的是，科学偶尔会与前两个方面，即与宗教伦理与形而上学方面相冲突。

历史上的一次大斗争发生在这样一种时刻：人们发现，地球不仅绕自身轴旋转，而且还绕太阳旋转。按当时宗教的理解，这是不该如此的。经过激烈的斗争，结果宗教从地球是宇宙的中心这一立场上后撤。但这种后撤最终并没有造成宗教的道德观的改变。另一次大冲突是人们发现人可能是从动物进化来的。大多数宗教都已经从其不正确的形而上的立场上一而再、再而三地后撤。但结果却是其道德观并没有明显变化。你看到地球围绕太阳转，是的，但那又怎么样？它能告诉我们“有人打我一边脸时，把另一边给人家打”是好还是不好？[1]这种与形而上方面联系在一起的冲突具有双重困难，因为它与很多事实相冲突。不仅是事

实，而且在精神上也相冲突。譬如对于太阳是否绕地球转这个问题，宗教与科学之间不仅在确认这一事实方面存在分歧，而且在如何对待这一事实的精神和态度方面也大相径庭。要了解大自然，我们必须接受某种不确定性，但这种认识却很难与信仰上的确定感相联系，这种确定感通常与深深的宗教信仰息息相关。我不相信科学家能像笃信宗教的人士那样对他的信仰是那般的肯定，或许可以做到，我不知道。我认为这是困难的。但是不管怎么说，宗教的形而上方面似乎与其伦理价值观联系不大，同时，道德价值似乎是以某种方式独立于科学领域之外的。所有这些冲突似乎并没有影响到伦理价值方面。

我只是说，伦理价值位于科学领域之外。我要辩驳的是很多人并不这么认为。他们认为，我们应该以科学的方式得到一些关于道德价值的结论。

对于这一点我有几个理由。你看，如果你没有一个好的理由，你就必须准备好几个理由。这里我有四个理由认为，道德价值位于科学领域之外。首先，过去有过那么多冲突。形而上学立场的变化实际上并没有对道德观点产生明显影响。因此这一点暗示我们二者间必定是相互独立的。

第二，我已经指出，至少我认为有这么一些好人，他实践着基督教伦理但却并不信奉基督的神性。顺便说一句，前面我忘了交代，我这里所说的宗教是一种狭义上的所指。我知道这里有很多人所信奉的宗教并不属于西方宗教。但宗教的主题是如此广泛，因此你最好是拿个具体的例子来考虑，你只需将我说的移植到你自己所属的宗教上，看看是不是这么回事，不论你是一个阿拉伯人还是一个佛教徒，或是属于别的什么教派。

第三个理由是，根据我所收集的科学证据，似乎没有任何地方对任何事情表示过圣经里的黄金法则是好还是不好。因此，关于道德价值是否独立于科学的问题，我没有任何建立在科学研究基础上的证据。

最后，我想做些哲学上的辩护——尽管这个我不是很在行，但我还是想从哲学上进行一些论辩，从理论上解释一下为什么我认为科学和道德问题是彼此独立的。人类共同面临的问题，一个大问题，始终是“我该这么做吗？”这是一个有关如何行动的问题。“我该做什么？我该这么做吗？”我们怎么来回答这样的问题呢？我们可以将它分为两部分。我们可以问，“如果我这么做，会发生什么事？”这个问题并没有告诉我们我是否应该这么做。我们还有另一部分，即“那么，我希望这事发生吗？”换句话说，第一个问题——“如果我这么做，会发生什么事？”——至少是属于可进行科学调查来回答的问题，事实上，它就是一个典型的科学问题。这并不意味着我们知道会发生什么，远非如此。我们永远不知道接下来会发生什么事情。科学是非常初步的。但是，至少是在科学领域，我们有办法来处理它。这个办法就是“试一下，看看有什么结果”——我们谈到过这一点——并积累起有关的信息，等等。所以“如果我这么做，

会发生什么事？”这种问题是典型的科学问题。但“我希望这事发生吗？”这样的问题则并非如此。譬如你说，如果我这样做，我会看到大家都被杀，当然我不希望出现这种情况。但是，你怎么知道你不希望有人被杀呢？你看，到最后你必须拿出一些最终的判断。

你可以采取不同的例子。例如，你可以说，“如果我遵循这种经济政策，我就会看到经济萧条，当然，我不希望出现萧条。”等一下，你看到了吧，仅仅知道会出现萧条并没有告诉你你希不希望它出现。这之后你必须判断，你是否想从中获得某种行使权力的快感，整个国家朝着这个方向发展的重要性是否抵得上给人民带来的苦难。或者，是否给一些人带来痛苦能够换回另一些人的痛苦的解脱。因此，沿着这条“什么是可宝贵的，人是否有价值，生命是否宝贵”等问题追问下去，你必然需要在某个地方形成最终的判断。你可以随着事情的进展将这种设问不断深入下去，但最终你必须决定“是啊，我要的就是这个”或“不，我不要这个。”这种决断具有不同的性质。我看不出你如何能够仅通过知道会发生什么就判断出它是不是你最终想要的结果。因此我相信，用科学技术来决定道德问题是行不通的，这是两个相互独立的事情。

现在，我想谈谈宗教的第三个方面，即灵感方面。这个问题也是我想问问大家的核心问题，因为我没有答案。今天，在任何宗教里，灵感的来源、力量和给人慰藉的源泉均与形而上方面紧密相联。也就是说，灵感来自于为上帝工作，服从他的意志，等等。但是，以这种方式表达的情感，认为你正在从事正当工作的强烈的情绪体验，会因对上帝的存在表示哪怕一丁点怀疑而变弱。因此，当对上帝的信仰变得不确定时，这种获得灵感的特定方法就失效了。我不知道如何回答这个问题：既能够保持作为大多数人的力量和勇气的源泉这一宗教的真正价值，同时又不必对宗教的形而上学体系保持绝对信仰。你可能认为，我们有可能为宗教创制一套形而上学体系，它能够以科学再也不会发现自身与宗教信仰相抵牾这样一种方式来陈述事情。但我不认为存在这种可能。我们不可能一方面在科学上采取冒险精神，向未知领域四处扩张；一方面却对问题事先给出答案，而且无论做什么，都不预料到某些答案早晚会被证明是错误的。因此，如果你要在形而上的方面保持绝对信仰，我认为不产生冲突是不可能的。同时我也不明白如何来保持宗教在灵感方面的真正价值，如果我们对它有些怀疑的话。这是一个很严肃的问题。

西方文明，在我看来，是建立在两大遗产基础之上的。一个是科学的冒险精神——一种进入未知领域的冒险，这一未知领域必须是为了探索而被认可的那种具有未知本质的未知领域，它要求宇宙中那些无法解答的谜题继续无法得到解答，它需要一种这一切都不确定的态度。总之一句话：智力的谦卑。

另一个伟大遗产是基督教伦理——建立在爱的基础上的行为，四海之内皆兄弟，个人的价值，精神的谦卑。这两大遗产从逻辑上讲是完全一致的。但逻辑并非一切。任何概念的贯彻需要人内心遵从一种观念。如果人们准备回归到宗教，那么他们准备回归的是什么宗教？现代教会

能让怀疑上帝甚至不信上帝的人感到满意吗？现代教会能使这种怀疑的价值得到肯定和鼓励吗？到目前为止，我们不是一直都在通过这些逻辑上一致的各种文化遗产之间的相互攻击以获得维持这些貌似冲突的文化遗产于不坠，并汲取到力量和慰藉吗？这是不可避免之路吗？我们怎样才能找到支撑西方这两大文明支柱的灵感，使得它们能够充满活力地并肩而立，互不戒惧？这个，我不知道。但我认为，关于科学和宗教的关系的认识，我也只能做到这样了。宗教不仅过去是而且始终是道德戒律的源泉，同时也是激励人心遵循这一戒律的力量源泉。

今天我们看到，国与国之间的冲突一如既往，特别是苏俄[费曼用用苏俄（Russia）指称当时的苏联，下同——译者注]和美国这两大阵营之间的冲突尤为严重。我一直认为我们并不清楚双方的道德分歧点。不同的人对正确和错误有着不同的看法。如果我们对什么是正确，什么是错误的认识都不能确定，又如何在这场冲突中选择立场？冲突在哪里？对于资本主义经济体系和政府控制的经济体系之间的对立，哪一方是正确的就是那么明确和绝对重要吗？我们必须承认其中有着很大的不确定性。我们或许可以相当肯定地说，资本主义要比政府控制好，但我们不也有自己的政府管制？这部分占到52%，这就是企业所得税控制。

宗教和无神论之间存在着争论。前者通常由我们国家代表，后者假定由苏俄代表。两种观点——它们仅仅是两种视角而已——没法定夺孰好孰坏。这里有人的价值观或者说国家的价值观的问题，即如何处理危害国家罪的问题——不同的观点——我们只能是不确定的。我们是否有真正的冲突？有的可能只是专制政府表现出对民主混乱的某种进步以及民主混乱表现出的对专制政府的某种程度的进步。表面上不确定性意味着没有冲突。这多好。但我不相信这一点。我认为有冲突是肯定的。我认为苏俄就代表着这样一种危险，譬如说，认为解决人类问题的途径已经明了，人类的所有努力都应该服务于这个国家，而这就意味着不再有创新。人类就像部机器一样，不再容许发展其潜能，不再容许表现出惊奇，不再容许多元化，不再容许对困难的问题采取新的解决办法，不再容许新观点。

美国政府是在没人懂得如何建立政府或如何治理国家的观念下发展起来的。其结果是创造出一种制度，用来在大家都不知道怎么办时治理国家。这种制度安排是这样一种体制，就像我们现在的制度，它容许发展和尝试新的设想，不好就扔掉。美国宪法的起草者们懂得怀疑的价值。例如，在他们那个年代，科学已经得到充分发展，显示出存在各种不确定性的可能性及其潜在价值，显示出对各种可能性不设限定的价值。事实上，你不能确定一件事意味着不知哪一天它就有另外一种可能。容许存在各种可能性是一种机会。怀疑和讨论是进步不可或缺的条件。在这一点上，美国式的国家治理是全新的，是现代化的，是科学的，也是充满变数的。参议员们为筹建本州的大坝拉选票，让所有人感到兴奋的讨论和游说取代了让少数人代表自己的机会等。美国的政府管理不是很好，但它可能是当今不同于英国政府的最伟大的政府，是最令人满意的、最现代化的政府，虽然管理得不是很好。

苏俄是一个落后的国家。当然，它在技术上是先进的。我已经描述过我所谓的科学与技术之间的不同。不幸的是，人们并没有明显感觉到工程和技术的发展与不容许出现新观点之间存在什么不协调。我们看到，至少是在希特勒时代，尽管科学没有得到发展，但却制造出了火箭。苏俄也可以制造火箭。尽管知道这一点让人难过，但这却是事实：技术的发展，即科学的应用，可以在没有自由的条件下进行。我们之所以说苏俄落后，是因为它还不懂得政府的权力需要限制。英国人的伟大发现——他们不是唯一想到这一点的人，但在近代史上，他们为此进行过长期斗争——是有可能对政府权力设限。在苏俄是不存在对思想进行批评的自由的。你会说，“不对，他们也讨论反斯大林主义。”但那只是某种确定的形式，只在一定程度上存在。我们应该利用这个优势。我们为什么不也来讨论反斯大林主义呢？我们为什么不挑明同这位先生的所有纠葛呢？我们为什么不指出一个容忍这样的事情在体制内滋生的政府会带来什么样的危险性呢？我们为什么不指出，苏俄国内受到抨击的斯大林主义其实与苏俄国内目前盛行的做法之间真有异曲同工之妙？好了，好了……

现在，我很激动，看……这些不过是情绪化的表现。我不该这么做，我们应该做得更加科学。除非我能让你们相信，这是一场完全理性的、不带任何偏见的科学论战，否则我是说服不了你们的。

我对这些国家有过一些体验。我曾访问过波兰，发现有些事情挺有趣。自然，波兰人民是热爱自由的，如今他们正处于苏俄人的控制之下，没有出版自由。但在当时，大约一年前我在那儿的时候，他们可以想说什么就说什么，就是不能发表。因此，我们便在公共场所就各种问题的方方面面进行非常活跃的讨论。顺便指出，在波兰，最令人难忘的事情是，他们受到德国蹂躏的创痛是如此之深、如此可怕和恐惧，以至于永远不可能忘记。因此，他们对所有外交事务的态度都带有对德国复兴的恐惧。我在那里的时候曾想到，这些可怕的罪行其实是部分自由国家所实施的政策的结果，这些国家曾一再容忍这种事情在波兰发展。因此他们接受了苏俄。他们向我解释，你看，苏俄人完全控制住了东德。纳粹没有办法在东德生存。而且毫无疑问，苏俄可以控制他们。因此，至少有该缓冲区。令我惊讶的是，他们并没有意识到，一个国家完全可以在不行使霸权、不驻扎军队的条件下保护另一个国家，并保证它不受侵略。

他们对我说的另一件事是，经常有人把我拉到一边，说我们惊讶地发现，如果波兰能够摆脱苏俄人，组成自己的政府，获得自由，他们迟早还是会变成现在这样。我说：“你是什么意思？我觉得很奇怪。你的意思是你没有言论自由？”“哦不，我们会拥有所有的自由。我们热爱自由，但我们也会有国有企业等。我们信奉社会主义思想。”我很惊讶，因为我不明白这样的问题。

好了……

每个人都很清楚，苏俄并不自由，这在科学上的后果是很明显的。最好的例子之一是李森科，他有一套遗传学理论，认为获得性特征可以遗传给后代。这可能是正确的。但绝大多数遗传影响无疑不是这样，它们是由种质传递的。确有一些实例，一些人们已知的例子表明，某种特性可以通过所谓细胞质遗传直接传递给下一代。但问题主要是，大部分遗传行为都不同于李森科认为的那样。因此他败坏了苏俄。伟大的孟德尔，就是发现了遗传规律、使遗传学走上科学道路的那位，已经谢世。但遗传学只在西方国家得到了继承，因为在苏俄不允许人们从事这类分析。他们不断地和我们进行讨论和争辩。结果很有趣。这件事中止了生物科学的发展，而在西方，生物学则是当今最活跃、最令人兴奋，也是发展最为迅速的科学。但在苏俄，则一无建树。与此同时，从经济的角度来看，你会认为这样的事简直就是不可能的。但无论怎么说，事实是由于不正确的遗传理论，苏俄的农业生物学落后了。他们没能正确发展出杂交玉米技术，也不知道如何培育品种更优良的马铃薯。过去他们是知道这些的。在李森科理论出笼之前，苏俄的马铃薯是世界上最大的。但今天他们再也没有这种优势了。他们只知道与西方辩解。

在物理学界，一度也有过这样的麻烦。最近，物理学家有了很大的自由，但还不是百分之百的自由。不同思想流派之间一直争论不休。一次，他们出席在波兰举行的一个会议，由波兰国际旅行社安排行程。自然，由于房间数量有限，他们只好安排几名苏俄人同住一室，由此铸成大错——这些人到了后就大吵："17年了我从没跟这个人交谈过，我不跟他同住一个房间。"

物理学也有两个流派。有好人也有坏人，而且泾渭分明，非常有趣。苏俄有过伟大的物理学家，但在西方物理学发展得更为迅猛，虽然一度苏俄的物理学曾显得欣欣向荣，但终究没能形成气候。

但这并不意味着技术没有发展，或者说它在某些方面落后了。我要表明的是，在这种国家里，创新思想难以得到发展。

你们想必对现代艺术的最近动态有所了解。我在波兰时，偏僻街道角落也有现代艺术画作的展示。在苏俄，现代艺术才刚刚开始。我不知道现代艺术有什么价值。我想你怎么理解都可以。但赫鲁晓夫先生看了这样一个地方，便认定，这幅画看起来好像是用公驴尾巴画的。我的评论是，他应该知道现代艺术的价值。

几千年过去了，未来前程远大，我们有各种机会，当然也有各种危险。人类要不想止步不前就不能停止思想。人类已经被阻滞了很长一段时间。我们不能容忍这一点。我希望未来的世代都能够享有充分的自由——怀疑的自由，发展的自由，继续冒险去发现做事新方法的自由，解决问题的自由。

为什么我们抓住这个问题不放？因为我们才刚刚开始。我们有充足的时间来解决问题。我们唯一会犯的错误就是，在人类尚不成熟的早

年，我们就认为我们知道答案。答案是现成的，没人能想到还有什么东西需要考虑。我们将变得封闭，将只局限于人类今天的想象。

我们不是那么聪明。我们很笨拙，很无知。我们必须维持一个开放的渠道。我相信受限的政府，我认为政府在很多方面都应受到限制。我现在所强调的只是知识。我不想同时谈论一切事情。让我们先考虑一小部分，考虑知识这件事。

没有任何政府有权决定科学原理的真理性，政府也无权以任何方式对所调查问题的性质开出药方。政府无权决定艺术创作的审美价值，也不能为文学或艺术的表现形式设限。它不应宣称各种经济、历史、宗教或哲学学说的有效性。它的责任就是确保公民的自由，让公民敢于进一步冒险并促进人类的发展。谢谢你们。

3.这个不科学的年代

当我接到邀请来做约翰·丹茨讲座，而且听说安排我做三次讲座时，我很高兴。因为我对这些问题考虑了很久，很希望有机会通过不是一次，而是三次演讲来慢慢地、仔细地梳理我的这些想法。我发现在前两讲中我已经逐步细致地完成了对这些想法的梳理。

有条理的想法已经讲完了，但对这个世界我还有大量不成熟的想法，这些想法都还未能梳理成明确的、有条理的容易理解的形式。因此，既然我已经答应要做三个讲座，那么我唯一可以做的就是将这些未加梳理的不成熟的感觉和盘端出。

或许有一天，当我找到了所有这一切背后的真正的深层次原因，我就能够将它们组织成一个好懂的演讲而不是像现在这样。此外，如果你因为我是一名科学家，而且根据发的小册子，知道我赢得过一些奖项等，从而开始相信我以前说过的一些事情是正确的，而不是依据你对这些思想本身的看法来直接判断它们的话——换句话说，你对权威怀有某种情结——那么今晚我就要让你摆脱这一点。我将通过这场演讲来表明，像我这样的一个人会给出什么样的荒谬结论和罕见的陈述。因此我希望能够铲除你们心中已有的任何权威形象。

你看，周六的夜晚应该娱乐娱乐，就是说……我想我现在找到恰当的感觉了，我们继续说下去。给讲座安个没人能信的题目总会产生好的效果。这样的演讲要么很特别，要么与你预料的正相反。而这正是我把这一讲的题目定为“这个不科学的年代”的原因。当然，如果你对科学的理解就是技术应用成果，那么毫无疑问，这是一个科学的年代。我们今天毫无疑问拥有各种科学应用成果，它们既造成种种麻烦，也带来种种好处。因此在这个意义上说，它肯定是一个科学的年代。如果你将科学年代理解为科学迅猛发展和全速推进的年代，那这肯定是一个科学的年代。

在过去两百年里，科学的发展速度一直在不断加快，我们现在处于发展速度的高峰期。特别是在生物科学领域，我们正处在取得最惊人发现的当口。至于会是什么新发现，我也说不上来。自然，这令人兴奋，就像你翻开一块又一块石头后不断有新的发现那样令人兴奋。这种状态已经持续了数百年，而且还在不断地高涨。从这个意义上说，这肯定是科学的年代。科学家称其为英雄时代，但其他人体会不到这一点。或许将来某个时刻，当历史回过头来看看我们这个时代，它会发现，这是一个最跌宕起伏充满戏剧性的时代，我们从对世界知之不多转变为知之甚多。但是，如果你将科学时代理解为在艺术、文学、人们对事物的态度和理解等方面科学发挥着巨大影响力的话，我不认为这是一个科学的年代。我们不妨回头看看，譬如说，以古希腊人的英雄时代为例，那时有

歌颂战争英雄的诗篇。再譬如中世纪宗教主导时期，艺术创作与宗教紧密相连，人们对生命的态度也与宗教观点紧密相连。那的确是一个宗教时代。从这个角度来看，当今还谈不上是一个科学时代。

其实，存在不科学的东西并不让我感到伤心。这个词没用错。我的意思是，我不担心存在不科学的事情。有些事不科学并非是坏事，也没啥了不起，不过是不科学而已。当然，所谓科学我是指那些可以试错的事情而言。例如，若当今的年轻人反复地呼喊说看到紫色的食人怪物的事，这显然荒诞不经。但如果我们还属于旧时相信有扁平脚怪物的一族的话，这就没啥了不起了。母亲对儿子唱起“来，约瑟芬，在我的飞行机器”听起来如现代“我想要带你乘慢船到中国”。因此，在生活中，在欢乐中，在情感世界里，在人们嬉戏追逐活动中，以及在文学等领域，不需要讲求科学，也没理由讲求科学。我们需要的是放松和享受生活。这不是批评的时候，批评也不是问题的关键。

但是，如果你停下来想想，你会发现有很多琐碎的事情谈不上科学，也没必要扯上科学。举例来说，前排还有很多空位，但有些人就是愿意（站在后面）。

有一次我在跟一个班的学生交谈时，有同学问我一个问题，大概是，“您有没有这样的经验，就是你在从事科学工作时，感到这些信息对其他工作可能也有用？”

（顺便说一句，我在最后会说到，当今世界在多大程度上是明智的、理性的和科学的。这是很大的一块。所以，我先说不好的一面，这更有趣，然后我们再在最后予以弱化。我觉得在谈论我认为不科学的那些事情的时候，这是一个很好的组织演讲内容的方法。）

因此，我想先来谈谈判断一个想法时的一些小技巧。我们的优势在于最终可以将这个想法付诸科学实验，这在其他领域或许就做不到。但尽管如此，这里判断事物的某些方法和经验无疑可以在其他领域发挥作用。所以，我从举几个例子开始谈起。

第一个要谈的是，一个人是否清楚他在说什么，他说的究竟有没有根据。我的诀窍非常简单：如果你问他一些需要动脑子想一想的问题——也就是那些尖锐、有趣、坦诚、直率、与问题直接相关且不带陷阱的问题——然后看他是否很快会卡壳。这就像小孩子问那些天真的问题。如果你问一个幼稚但相关的问题，那么这个人几乎不可能立即做出回答，如果他是个诚实的人的话。明白这一点很重要。我可以举个例子来说明这个世界不科学的一面，如果我们做得科学一点的话，这方面原本可以做得很好。这个例子与政治有关。假设两位政治家竞选总统，其中一位经过一个农场，被问道：“对于农业问题你有什么打算？”他马上给出答案——言辞卓卓，侃侃而谈。现在轮到另一位候选人：“对于农业问题你有什么打算？”“嗯，这我不知道。我当过将军，但对农业可以说一无所知。在我看来，农业问题想必是个非常困难的问题，因为人们已

经为此奋斗了十二年，不，十五年，甚至二十年，人们总认为他们知道如何解决农业问题。由此可见，这一定是个很难解决的问题。所以我打算这样来解决农业问题，就是组织起一批懂农业的人，分析此前我们为解决这个问题而取得的所有经验，花上一定时间，找出合理的解决方案。但现在我不能事先告诉你结论是什么，我只能给你一些我会尝试使用的原则——决不让每户农民的生活变得困难，如果遇到具体问题，我们一定想出具体办法来照顾他们……”

如今，在这个国家里，这样的人永远不会取得成功，我想。当然也从没人这么试过。在大众的心目中，政治家必须有答案，而且能给出答案的一定比给不出答案的更值得期待，尽管在大多数情况下，实际情况往往恰恰相反。由此带来的结果当然是政治家必须给出答案，其结果则是政治承诺从来不会兑现。这是一个无情的事实，不存在兑现的可能——结果是没有人相信竞选承诺，人们普遍鄙视政治，对尝试解决问题的人普遍缺乏尊重，等等。这都是（也许——这里只是简单的分析）从一开始就注定的结果。也许一切都源于这样一个事实：公众的心态就是要寻找答案而不是寻找一个设法给出答案的人。

现在我们来看看科学的另一个方面——对每个一般性概念，我只给出一两个例子来说明——就是如何处理不确定性。关于不确定性的概念，我们可以举出一大堆笑话。我想提醒你，你可以确信很多事情，即使你不是十分有把握，你大可不必凡事都小心求证后再行实施，事实上也完全做不到不偏不倚。有人对我说：“喂，你都不清楚还怎么教孩子分辨什么是正确，什么是错误的？”那是因为我有把握肯定何谓对错。我不是绝对肯定，有些经验可能会改变我的想法。但我知道我教给他们的是什么。当然，孩子也不会完全按照你教给他的来学习。

我想谈点技术性较强的想法，以后你会看到，这是我们在处理不确定性的问题时必须搞懂的。一件事情是如何从几乎肯定是假的过渡到几乎肯定是真的的呢？在这里经验是怎样发生变化的呢？你如何依据经验来处理这种确定性的变化的呢？技术上确实比较复杂，但我会给出一个相当简单的理想化的例子。

我们假定有两种理论来判断某事的发生，姑且称为“理论A”和“理论B”。于是问题变得复杂了。在你进行观察之前，出于这样或那样的理由，譬如你的过去经验、其他人的观察结果或直觉等，总之你对理论A的确信程度要高于对理论B。现在假设要判断的是你观察一项测试的结果。根据理论A，应该什么变化都没有。但根据理论B，结果应该呈蓝色。而你的观察结果是变得有点绿。于是你检视理论A，说“这根本不可能呀。”再转向理论B，你有点明白了，“嗯，应该呈蓝色，但带有绿色也不是不可能的。”于是，观察的结果是理论A的可信度下降，理论B的可信度上升。如果你继续进行更多的测试，那么理论B的可信度就会越来越高。顺便说一句，这里说的更多的测试不是简单的重复测试。无论你做多少次简单的重复测试，绿色的结果不会给你带来确定性的提高。但如果你发现，鉴别理论A和理论B的很多其他方面的测试都反映出二者

的不同，那么通过这些结果的积累，理论B的可信度就大大增加了。

举个例子。假设我在拉斯维加斯遇到一个相术家，他能够洞悉对方的心思。或者说，他自称不是相术家，但是具有心灵传动的能力，就是说他可以纯粹通过思维力量来影响事物的行为。这家伙走过来对我说："我来做给你看。我们站到轮盘赌那边去，我会事先告诉你是每次开的是红的还是黑的。"

在这之前我认为，譬如说，你选什么号码没任何区别。根据这么多年从事自然科学和物理学研究的经验，我不相信有什么心动术。试想，如果我相信那个人是由原子制成的，如果我知道原子间相互作用的一切——绝大多数——规律，那么我是看不出心灵有什么办法能直接影响到轮盘上的小球的行为。因此，从其他经验和一般知识出发，我强烈反对心灵相术。它们成功的概率不会超过百万分之一。

现在我们开始。相术家说轮盘这次会开黑色。开出果然是黑色的。相术家说这次将是红色。结果确实是红色。你现在相不相信相术了？不信，这只是碰巧了。那就继续。相术家说这次是黑色的。结果是黑色的；相术家说这次是红色的。一开，确实是红色。开始冒汗！我要琢磨琢磨，学到点东西了。接着开盘下去，假设我们开了10次。而连续10次都猜对也不是不可能，只是概率只有千分之一。因此，现在我可以断定，这个相术家真具有这种能力的概率是千分之一，而此前只有百万分之一。但如果我再来10次，他还是全对，你看，他是能够让我相信的，尽管不是百分之百。但就这点不确定性就足以使我们想到会不会还有其他原因。我们总可以找到一种替代理论来解释，我本该在前面有所提及这一点。譬如当我们走到轮盘桌前，我在心里就可能会想到，这个所谓的相术家与赌场之间存在着串通的可能性。这是可能的。起初这家伙看起来并不像与火烈鸟俱乐部有过什么勾结，因此我怀疑他作弊的可能性为百分之一。但之后，他连续10次成功，而我对心灵感应的成见又是如此严重，因此我得出结论：这里一定有勾结，可能性上升到10比1。我的意思是说，是勾结而不是意外使可能性变为10比1，而不存在勾结的可能性则仅为万分之一。对于我这么有成见，又声称他有勾结，他该怎么证明他的相术确实有效？有办法，我们可以换一家俱乐部再做其他测试。

我们可以做其他测试。我可以买来骰子，单独开个房间进行测试。我们可以持续不断地开盘来摆脱所有其他可能的解释。但他在轮盘前就是站到永远也无济于事。他可以总是猜对，但我的结论就是这里一定有串通。怎么办？

他仍然有机会通过做其他事情来证明他的相术是真的。譬如我们去另一家赌场，他能猜对；那就再换另一家，还是能猜对；我买来骰子，仍屡试不爽；我带他回家，自己做个轮盘，结果还是一样。我该怎么下结论？我得承认，他的相术确实有效。可能还真是那么回事，当然也不是完全确定，只是确信的概率大增。有了这些经验之后，我有一定的把

握说他的相术是真的。但也可能随着新经验的增长，我或许会发现，有办法通过别人很难注意到的嘴角吹气来影响结果，等等。如果我真的有此发现，那么这个确信的概率就又要大打折扣了，因此不确定性是永远存在的。但在很长的一段时间里，通过一系列测试，我们有可能得出确实存在心灵感应的结论。如果是这样，我会非常兴奋，因为以前我确实没想到有这等事情。我学到了以前不知道的东西，而且作为一个物理学家，我会将它作为一种自然现象来研究。譬如看看是否与他到开盘用的球之间的距离有关？如果在这之间插若干块玻璃或纸板或其他材料会怎么样？这种方法对所有这些事情一直都是很有效的。磁是什么，电是什么，就是这么搞清楚的。什么是心灵感应当然也能够通过这类充分的实验来分析清楚。

无论如何，我们总可以找到如何对付不确定性、如何科学地看问题的例子。即使你对相术心存一百个不信，也不意味着你就能够永远不信会有真正的相术家。能够使你永远不信会有真正的相术家的唯一途径只能是下面二者之一：要么是你只能做有限次数的实验，他不让你无休止地做下去；要么是你打一开始就心存无限偏见，认为它就是绝对不可能的。

现在我们来谈检验真理的另一个方面。可以这么说，这种情形不仅在科学上有效，而且某种程度上说在其他领域也有效。那就是，如果事情是真的，确实如此，那么如果你继续观察并且改进观察效果，事情就会暴露得更为明显，而不是更不明显。也就是说，如果那里真有东西，而你因为隔着有雾的玻璃看不清，那你擦干净玻璃再看，就会看得更清晰而不是更模糊。

举一个例子。我印象中是弗吉尼亚州的一个什么地方的一名教授，曾在多年里就心灵感应问题做了大量实验，心灵感应与意念控物属于同类现象。在他的早期实验里，用的是一套印有不同设计图案的牌（你可能熟悉这些，当时这种牌哪儿都有卖的，人们常玩），实验内容是，在其他人能够看到牌并想着这张牌的情形下你来猜测他看到的牌的图案是圆形还是三角形还是其他什么。你可以坐着，但看不到牌，只有他能看到牌并想着这张牌，你只能猜他想的是什么。在研究开始之初，他发现这种感应非常显著。有人能猜对10至15张牌，而平均来看猜对的应只有5张。更有甚者，有人居然能够接近百分之百地猜对所有牌。真是优异的相术家。

不少人就此提出了批评。例如，人们指出他没将所有没有奏效的样本统计在内。他只取那些为数不多的奏效的，然后就不再做统计了。此外还有大量的明显线索表明，看图者和猜图者之间存在着有意无意的信号传递。

人们对采用的技术和统计方法进行了各种批评。逼得实验技术有了改进。结果是，虽然理论上猜对的平均值应为5张牌，但大量实验结果的均值却是6.5张，但再也没出现猜对10张、15张甚至25张的事情。因

此，这一现象说明第一轮实验是不正确的。第二轮实验证明第一轮实验中观察到现象是不存在的。但现在均值为6.5而不是理论上的5这一事实却为存在心灵感应带来了一种新的可能性，只是强度水平要低得多。这是一个不同的概念，因为，如果此前的事情是真的，那么在改进了实验方法后，这种现象就应继续存在，也就是说，仍能猜对15张牌。为什么会降到6.5张了呢？答案只能是技术改进了。现在的问题是，6.5仍然要比理论上的统计平均略高一点，怎么解释？这时人们的非难会变得更为细致，他们注意到其他一些不起眼的效应，这些都可能影响到结果。根据该实验教授的说法，在测试过程中，人会感到疲倦。有证据显示，这时受试者猜对的概率平均而言会略有降低。但如果你剔除掉那些猜中率较低的个案，那么统计规律就不准了，统计均值变得略高于5，等等。因此，如果该受试者确实是疲倦了，那么最后两三组数据就应剔除掉。事情就这样不断地改进。结果显示心理感应效应仍然存在，但现在均值已降到5.1，因此，所有的实验表明6.5也是虚假的。现在问题是5会怎样……我们可以永远这么追问下去，但关键是，实验总是有误差的，这些误差的来源很微妙，不可能穷尽。但我不相信这一实验研究证明了存在心灵感应的原因是，随着技术的改进，这种效应不是变强而是变弱。总之，每一次后续实验都驳倒了前面实验的所有结果。如果记住这一点，那么你就领悟到了事情的原委了。

当然，人们一直对心灵感应之类的事情抱有很深的成见，因为它们源自于19世纪的各种招魂术、骗术等勾当。成见使得要证明一件事情变得更难，但是如果事情真的存在，那么它迟早总是会显露出来。

令人感兴趣的一个例子是催眠现象。人们接受确实存在催眠术这一事实曾经历了相当长的时间。催眠术的使用始于梅斯梅尔先生，他让患有歇斯底里病症的病人坐在一个连着很多管子的浴缸边，病人扶着管子，慢慢就会平复下来。这一现象里就有部分是属于催眠现象，只是这之前人们从没有认识到。从这个开端你可以想象要让人们对足够充分的实验给予足够的重视是多么艰难。幸运的是，催眠现象已经被提炼出来并得到无可置疑的证明，尽管它的开端是如此怪异。因此，使人们抱有成见的起因不是事情有一个怪异的开始，而是他们打一开始就有偏见。但经过调查之后，你是会改变态度的。

另一个原则是，我们所描述的效应必须具有一定程度的恒常性或某种不变性，就是说，如果一种现象很难用实验来观察，但如果它可以从许多方面来看出，那么它必定在某些方面是大致相同的。

我们以遇到飞碟为例。描述这一事件的困难在于，几乎每个看到过飞碟的人看到的都是不同的东西，除非他们在此之前被告知他们有可能看到的是什么。因此，在飞碟观测的历史中，所谓飞碟从橙色光球、地板弹起的蓝色球状物、消失的灰雾、游丝般流入空气的热蒸汽、罐头盒、具有类似人形的古怪形状的短粗物体等，应有尽有，不一而足。

如果你对大自然的复杂性和地球上生命的进化有一点鉴赏力，你就

能理解生命可能具有极其繁多的各种可能形式。有人说生命离不开空气，但水下不乏生命形态。事实上，生命就始于大海。你能够四处走动并有神经系统。植物则没有神经。对生命的多样性只要想上几分钟，你就会明白，所谓飞碟不可能像人们形容的那样。非常不可能的。飞碟根本不可能这么巧正好在这个特定的时代无声无息地到来。它为什么不早点来呢？我们刚刚懂点科学，知道了可以从一个地方旅行到另一个地方，飞碟就来了。

有许多性质十分可疑的论据认为，飞碟来自金星——事实上，这种看法相当可疑。这么多疑问意味着需要做很多精确实验才能一一加以验证，但观察到的现象的各种特征之间缺乏一致性和恒常性则意味着它很可能根本就不存在。除非问题暴露得较为清楚，否则就不值得去关注。

我曾经与很多人争论过飞碟的事情。（顺便指出，我必须解释的是，我是一个科学家并不意味着我不与普通人接触。我知道他们的所好。我喜欢去拉斯维加斯，也喜欢和漂亮女孩交谈，也喜欢打赌等。我的生活同样有声有色，所以我了解普通百姓。）譬如你知道，我就在海滩上与人们争论过飞碟。我感兴趣的是：他们老是争辩说这是可能的。这么说没错，是可能的。但他们不明白，问题不在于证明是否存在这种可能性，而在于是不是将要发生。在于它是否就要出现，而不是它是否可能出现。

这就引出了我对各种概念的第四种态度，就是说，这个问题不是那种是否存在可能性的问题。那不是问题。问题是出现的可能会是什么，发生的到底是什么。你一次又一次地证明不能否定这有可能是飞碟，那没用。我们必须提前猜到我们是否有必要担心火星人入侵。我们必须作出判断，它到底是不是一个正在飞行的飞碟，这种想法是不是合理，到底有多大可能。这些判断我们通常更多的是基于经验，而不是只看它有没有可能，因为普通人无法充分了解事情发生的可能性具体有多大。因此他们不清楚很多理论上可能的事情实际上都不可能发生。因此说每一件仅存在理论可能性的事情都将发生这是不可能的。这二者之间简直异如霄壤，所以你觉得有可能的大多数事情其实是不真实的。事实上，这是物理学理论的一个一般原则：无论你想的是什么，十有八九都是错的。因此在物理学史上，称得上正确的理论也就五到十个，我们想要的也就这些。但这并不意味着所有事情都是错的。有错我们总会发现。

为了找个例子来说明什么是将仅仅存在可能性的事情误判为现实中就将发生的事情，我们不妨以圣母西顿的宣福礼[2]为例。这是一位圣洁的女人，她为很多人做了很多好事。这一点毫无疑问——请原谅，应当说少有疑问。教皇已昭告天下：她彰显了美德的伟业。在天主教里，到此阶段即确定为圣母，接下来的问题是要考虑奇迹。因此下一个问题就是确定她是否能创造奇迹。

有一个女孩得了急性白血病，医生们不知道如何来医治她的病。家里人病急乱投医，试了各种办法——不同的药物，各种能想到的措施。

其中就有这样一种办法：将一条与圣母西顿的遗骨接触过的丝带别在女孩的床单上，并且安排了几百人为她的康复祈祷。结果——不，不能说是结果——然后她的病体略有起色。

一个特别法庭被安排来调查此事。很正规的，非常小心，也非常科学。其实凡事就该这么处理。每一个问题都要问得非常仔细，问的每一件事情都要非常谨慎地记在本子里。结果记录厚达1000页，翻译成意大利文后，编辑造册，用特殊的绳子捆好，然后被送往梵蒂冈。特别法庭问参与医治的医生，他们觉得病情如何。医生们一致认为，以前没见过这种情形，这个病例完全不同寻常，以前从没有过得了这种类型白血病的人能够将病情稳定得这么久。结束。诚然，我们不知道发生了什么。没有人知道发生了什么。这有可能是个奇迹。但问题不在于是否有可能出现这个奇迹，而是是否真的出现了这个奇迹，特别法庭的问题正是要确定是否真的出现了这个奇迹，要确定圣母西顿是否真的对此有影响。噢，他们做到了，在罗马做到的。我不知道他们是怎么做到的，但这恰恰就是问题的核心所在。

问题是疗效与对圣母西顿的祈祷过程之间是否存在关系。要回答这个问题，就必须收集所有有利于说明向圣母西顿祈祷在不同病人、不同病程中作用的病例。然后，他们还必须将这些祈祷有明显疗效的案例与没有祈祷的普通人的平均治愈率进行比较，等等。这是一种诚实的、直截了当的调查方式，其中不掺杂任何不诚实和亵渎的成分，因为如果它是一个奇迹，它就靠得住；如果它不是奇迹，科学方法就将摧毁它。

学医并尝试给人治病的人对能够找到的每一种方法都感兴趣。他们发展了临床技术（所有这些技术问题都是非常难的），并试着进行各种药物治疗方法。于是这女孩的病情出现了好转。她在病情好转前还出了水痘。这有什么关系吗？这可以有确定的临床方法——通过比较等——来检验，到底是什么在起作用。问题不在于确定到底发生了什么令人惊讶的事情，而是要真正利用好这件事，确定下一步要做什么，因为如果事实证明病情好转确实与圣母西顿祈祷者的行为有关，那就将值得圣母西顿的尸骨发掘出来（实际也是这么做的），将骨头收集好，拿许多丝带去接触，然后把丝带别在其他病床上。

现在我想谈谈另一个原则或概念，那就是在一件事情已经发生后再来考虑其发生的概率或是否偶然没有任何意义。很多科学家甚至不明白这一点。其实，我第一次与人争论这一点时我还只是个普林斯顿大学的研究生。当时心理学系有个家伙正在做小鼠比赛实验。我的意思是他有一个T形迷宫样的东西，让小鼠在里面走，它们或转向右，或转向左，等等。心理学家在这些测试中的一般原则是，通过安排使事情偶然发生的概率变得很小，实际上不到1/20。这意味着，他们的法则出错的可能性只有1/20。但计算小鼠是向右还是向左的概率的统计方法就像计算掷硬币出现正面或反面的可能性一样，很容易搞清楚。这位老兄设计了一个实验，想要证明什么我已经不记得了，大概是看小鼠是否会总向右转，譬如说。确切的我的确不记得了。反正他得做大量测试，因为否则

的话它们跑向右就可能是偶然的，因此要使得出错概率小于1/20，就必须多次做实验。这种实验是很难做的，但他做到了足够多次。结果他发现这样做实验得不到确定的结果。小鼠忽而向右，忽而向左，毫无规律。但他注意到，小鼠的跑向有着明显的交替性，开始向右，然后向左，接着再向右，然后再转向左。后来他来找我，说："帮我计算一下出现交替的概率，看看它是否小于1/20。"我说："大概是小于1/20吧，但它没意义。"他问："为什么？"我说："因为事后计算本身就没有任何意义。你看，你觉得奇怪，所以就选择了这种怪事来考虑。"

再譬如，今天晚上我就碰上了件出格的事儿。在来这里的路上，我看到一辆车牌为ANZ912的车子。请帮我算算在华盛顿州的所有车牌中我碰巧看到ANZ912的概率。显然这是个荒谬的事情。那么同样，这个心理系的实验者必须这么做：小鼠向两个方向轮流跑这一事实暗示存在向两个方向轮流跑的可能性。如果他想检验这个假设，看看是否超过1/20，他不能用原先的数据来进行，而是必须另外设计一套实验，看看是否存在交替性。他这么做了，结果证明这个假设是错的。

许多人喜欢听信道听途说得来的东西，而且这些东西往往只是个孤例而不是经常发生的事情。人们容易记下碰巧发生的各种事情并受其影响，而且还会举证说，这个你怎么解释。我记得在我生活中也遇到过这样的事情。我来举两个最明显的例子。

第一个是我在麻省理工学院读书时的事情。当时我正在学生会的楼上写一篇哲学方面的论文。我全神贯注，除了论文主题脑子里没有其他任何事情。突然，很神秘地，我心头掠过一种思绪：我祖母去世了。当然，我现在这么说有点夸张，就像你在谈论这类事情时那样。这种感觉或有或无地持续了近一分钟，但不是很强烈，我夸张了点。重要的是，紧接着楼下的电话就响了。这一点我记得很清楚，因为有人接了电话，招呼道："嗨，彼得，电话！"我不叫彼得，显然是在叫别人。我祖母活得好好的，什么事都没有。我们所要做的就是注意积累大量的这类事情，以对付那些很少出现的不测事件。怪事是会发生的，不是不可能的。但从此以后我就该相信这种奇迹？相信我可以从脑海里的某种思绪感知到祖母是否病了？这类轶事的另一个特点是事发时的所有情况都没法描述。对此我来谈谈另一个例子，尽管有些伤感。

我在十三四岁时遇到过一个女孩，我很爱她，十三年后我们结婚了。但她不是我现在的妻子，一会儿你就会明白。当时她患有肺结核，实际上，她生这病已经有几年了。当我得知她得了肺结核时，我送给了她一只闹钟，是那种大数字翻动的钟，不是带指针的那种。她很喜欢这个钟。生病的那天我把它给了她。她一直将它放在床头有五六年，她的病情越来越重，最后过世了。死亡时间是在晚上9时22分。那天晚上钟也停在了9时22分，以后再也没动过。有幸的是我注意到一些细节，我得告诉你。这只钟走了五年后逐渐慢了下来。每隔一段时间，我就得修一修它，因此轮摆变松了。其次，护士要在死亡证明书上写上死亡时间，但因为房间里光线太暗，她就把钟翻过来，凑近了看上面的数字，

然后又把它放下。如果我没有注意到这些细节，我想就会又遇到一些麻烦。因此在谈论这些掌故时我们必须非常小心，要记清楚所有情况，甚至正是那些你没有注意到的事情恰恰可能是解开谜团的关键。

所以，简而言之，你不能因为一件事情发生了一两次就认为它的出现是必然的。一切都必须经过非常小心的检核。否则你就会变成什么疯狂行径都相信但却不了解自己周围世界的人。没人能对所处的世界完全了解，只是有些人比其他人了解得更多一些。

技术上还有一个方面要说说，那就是统计样本。在我说他们试图安排实验以便得到1/20的概率时，我指的就是这个概念。统计抽样这个主题的数学性比较强，我不想深入到具体细节，但总的概念是很清楚的。如果你想知道有多少人身高超过6英尺，于是就随便挑选一些人来量他们的身高，你看到也许有40个人的身高超过6英尺，因此就认为可能每个人都如此。这听上去是不是很愚蠢？其实这是也不是。如果你按能否通过一个低矮的门来选出100个人，那你肯定错了。如果你从你的朋友里挑选100个人，你还是错了，因为他们都来自这个国家的同一个地方。但如果你挑选的方式与人的身高没有任何关系，而且从这100个里面找到了40个身高超过6英尺的人，那么就有把握推断说在1亿个人中有4000万个身高超过6英尺的人。到底要多少个样本才合适是可以精确搞定的。实际上，可以证明，精确度要达到百分之一，你必须有10000个样本。人们没有认识到要达到这个精度是多么困难。为了要达到百分之一或二的精度，你需要至少做10000次尝试。

想判断电视上做广告的效果如何的人用的就是这种方法。不，应该说他们认为他们用的是这种方法。这是一件非常困难的事情，其中最困难的就是样本的选取。他们是如何安排才会有一个普通人愿意将一种小装置放进自己家里，通过它，他们能够记录下所看的电视节目，或者什么样的人才称得上是这样的普通人，他愿意有偿为他们写日志，他在日志中写的每15分钟就能听到这个广告的准确性到底如何，我们都不得而知。因此，我们无法通过这一千个或一万个人的统计样本的行为就推断说一般人是看了还是没看这个广告，因为毫无疑问，样本是有偏差的。这种统计做法是众所周知的，而且都知道选取一个好的样本是一个非常重要的事情，这是一项科学作业。除非你不做统计。所有的统计研究者都认为，世人都很笨，告诉他们什么事情的唯一方法就是不断侮辱他们的智慧。这一结论可能是对的。另一方面也可能是错的。如果它是错的，那我们可就犯大错了。因此，要真正弄清楚怎么来检测人们是否注意不同类型的广告，还是个需要相当尽心的事情。

正如我前面所说，我认识很多人，普通人。我认为他们的智商受到了侮辱。我的意思是在各方面都存在这种情形。你打开收音机，如果你有点个性，非疯了不可。但人们有办法——我还没有学会——就是不听它。我还不知道怎样做到这一点。因此，为了准备这次演讲，我就在家里打开收音机听了三分钟，结果听到了两件事。

首先，打开收音机，我听到的是印第安音乐，新墨西哥州纳瓦霍斯印第安人的音乐。我懂一点这种音乐，以前在盖洛普就听过它，我很高兴。我就不模仿那种战争般的反复轮唱了，虽然我很想这样做。这对我很有诱惑力。这种音乐非常有意思，浸透了他们的宗教精神，深受他们的尊重。因此，我要实话实说，很高兴能在电台里听到这么有趣的东西。这是文化。我们必须老实承认。我敢说，如果你听上三分钟，你一定会觉得它的确不错。所以我一直在听。我要承认我编了一点点。我一直在听，因为我喜欢它，这多好。突然，音乐停下来了。接着一个男声说："我们正在与交通事故作斗争。"然后他接着说你要小心别被汽车撞着。这不算是对智慧的侮辱，而是对纳瓦霍印第安人的侮辱，是对他们的宗教和他们的思想的侮辱。所以，我接着听下去，直到我听到开始叫卖某种类型的饮料，好像是百事可乐吧，说这是认为自己年轻的人喝的饮料。于是我说，得了，就到这儿吧。我想了一会儿，觉得这事儿整个一个疯子。什么叫认为自己年轻的人？我想是指那些喜欢做年轻人喜欢做的事情的人吧。有人喜欢这样没什么不好。那么这就是为这类人准备的饮料。我猜想，饮料公司研究部的人在决定该兑多少柠檬汁的时候一定会这样说："嗨，我们过去生产的都只是普通饮料，我们必须重新设计配方，不针对普通老百姓，而是专为特想保持年轻的人提供的。多放些糖。"一种专供想保持年轻的人喝的饮料，整个儿设想简直荒谬绝顶。

因此，按照这个结果，我们总是受到侮辱，我们的智慧总是被侮辱。我有个如何战胜它的点子。为对付它人们采取了各种计划，你知道，联邦贸易委员会也一直在努力整顿这类事情。我倒有一个简单的设想。假设你将大西雅图的26个大广告牌全包下来租它一个月，这其中有18块还带照明。你在广告牌上刷上标语："你有没有感到智慧受到了侮辱？不买这种商品！"然后你在电视或广播电台也买下几个时段。在中间插播广告时有个男声说："对不起，打断一下，如果你发现哪种广告在侮辱你的智商，或以任何方式扰乱你，我们建议你不要购买该产品。"事情很快就会得到解决。谢谢各位。

如果有人想烧钱，我建议他们不妨做个实验，看看普通电视观众的智商到底有多高。这是个有趣的问题，是了解自己智慧的一条捷径。尽管有点昂贵。

你说，"这并不十分重要。广告商总得卖东西吧，"等等。但从另一个角度看，认为老百姓没头脑是个非常危险的想法。即使真是这样，也不该用现有的处理方式来处理。

报纸记者和评论员——有一大批这样的人，他们认为公众比他们笨，他们这些记者和评论员理解不了的事情公众也一定搞不懂。这是何等的荒谬！我不想说他们比一般人笨，但他们在某些方面确实比其他一些人要笨。如果我要向记者解释一些科学上的东西，而他问"这个概念是什么意思？"那我就会用简单的词汇向他解释，就像我解释给邻居听那样。他不明白，这是可能的，因为他的成长环境不同——他没修过洗衣机，也不知道什么是电机，等等。换句话说，他没有技术经验。而这世

界上有大量的工程师，有许多在机械方面很有天赋的人，有很多人譬如说在科学方面要比记者聪明。因此，既然他的职责就是报道事情，那么不论他理解与否，他都应该按照采访对象告诉他的那样准确地报道出来。对于经济学和其他领域的报道也一样。记者大都认同这样一个事实：尽管他们不太熟悉国际贸易方面的复杂业务，但他们基本上能够按照采访对象所说的意思进行较为准确的报道。但一旦涉及科学问题，出于这样或那样的原因，他们会拍拍我的头，向愚钝的我解释道，老百姓脑子慢，很难明白你说的这些，因为他自己，笨脑瓜一个，无法理解这些东西。但是我知道有些人是能够理解这些东西的。不是每个看报的人都必须读懂报纸上的每一篇文章。有些人对科学不感兴趣，但有些人感兴趣。至少他们能搞懂那是怎么回事，而不是发现重达7吨的机器弄出了一种原子子弹。我读不下去这样的文章。我不知道它说的是什么意思。我不知道重达7吨的是一种什么样的机器。现在基本粒子多达62种，我想知道这种原子子弹是用哪种粒子制造的。

这种统计抽样的做法，以及用这种方法来确定人的属性的做法问题的确非常严重。这种方法应得到充分利用，但对它的使用必须非常非常的小心。它可以用于人事上（通过考试）选拔人才，也可以用于婚姻咨询，凡此等等。但它被用来决定人们是否能够上大学，我就不赞成，关于这方面的论辩我就不在这里展开了。有谁决定上加州理工学院，可以来找我讨论这些问题。在我给出这些论据之后，有机会我会回来告诉你们有关的结果。但是大学录取工作除了有抽样方面的困难外，还有其他方面的严重问题。现在有一种趋势，就是只用可以定量衡量的数据作为取舍依据。就是说，人的精神，他感知事物的方式，很难得到衡量。有种倾向是通过面试来设法矫正单纯考试带来的偏差。这当然很好，但多考几次要更容易些，因此人们不愿意把时间浪费在面试上，结果是只有那些可以定量衡量的东西，其实是他们认为他们可以定量衡量的东西，才会被考虑，很多好东西则被排斥在外，很多人才就这样被错过了。所以这种事情做起来是有风险的，必须经过非常仔细的检查。像经常出现在杂志上的有关婚姻问题的测试，“你和你丈夫相处得怎样？”等等，都是无稽之谈。那上面通常会说：“这项测试已经有一千对夫妇做过。”然后你会被告知人家是如何回答的，你再对比你是如何回答的，就可以知道你的婚姻是不是幸福美满。做这种问卷调查，你要做的是下列这些事情。你整理出一堆问题，诸如：“你让他在床上吃早餐吗？”等等，然后将这问卷发给1000对夫妇作答。同时你有一个与问卷调查独立无关的办法来探知答卷者的婚姻是否幸福美满，譬如直接问他们，或其他方式等。不过这都没关系。即使问卷设计得非常完美，也没什么区别。这不是问题之所在。然后你这么做：你观察所有那些洋溢着幸福的夫妇——看他们是如何回答在床上吃早餐的，他们是如何对这个或那个问题作答的。你看到了吧，这同小鼠走迷宫向左转向右转完全一样。他们已经根据一个样本确定了事情发生的可能性。如果他们做事地道，那么接下去该做的就是用设计好的问卷再做同样的测试，现在他们已知道如何评分。这样答题给5分，那样答题给10分，其依据就是那一千对夫妇的答卷，如果他们很快乐，就得高分；不快乐就得低分。但现在是对这一测

试再行测试。他们不能使用原先用来确定得分的样本。那样的话就又回去了。他们必须独立地另找1000对夫妇再行测试，看看是不是幸福的都得高分，不美满的都得低分。但他们不会这样做，因为一是那样太麻烦，他们没有时间；再者他们试过几次，发现这种测试不十分有效。

现在看看世界上所有这些不科学的、稀奇古怪的东西所带来的麻烦，我认为其中有很多事情其实并不是因为思考上有多么困难，而只是由于缺乏信息。特别是占星术，信的人有很多，毫无疑问，在座的一定也有不少。星相师说，有些日子去看牙医要比其他日子好。如果你生在某一天的某个时辰，那么你在某某天坐飞机就更安全。这些都可以按星相位置采用一定法则计算出来。如果真是这样，那将是非常有趣的。卖保险的对此最有兴趣了：他们可以按照占星术规则来改变投保人的保险费率，因为这些人在这些天里坐飞机安全性更高。但星相师从来没有检验过那些不该在那天登机的人登机的结果是否挺糟糕。哪天是做生意的好日子哪天不是这种问题从没有被真正搞清楚过。那占星术到底有没有用呢？

也许它的确是真的，是的。但另一方面，有数不尽的信息表明它不正确。因为关于如何工作有效率，人是什么，世界是什么，恒星怎么回事，你看到的行星又是怎么回事，是什么让它们不停地转呀转，两千年后它们会在什么地方，等等，所有这些问题我们都完全清楚。我们没有必要抬头看看才知道它们在哪里。而另一方面，如果你非常仔细地读读不同星相家编的书，你会发现它们彼此矛盾，这时你怎么办？最好就是不相信它。那一套东西根本就没有证据，纯粹是无稽之谈。你之所以会相信这些事情的唯一原因就是普遍缺乏关于星星和世界以及其他看起来像那么回事的东西的信息。如果这种现象存在，那它就会是极其显著的，会在所有其他现象面前表现出来。除非有人能用真实实验向你证明，能将相信的人和不相信的人拢在一块做一次检测，如此等等，否则就没理由非要听他们摆布。顺便说一句，这种测试早在科学诞生之初就已经有了。那是相当有趣的。我发现在早年间，譬如发现氧气等的那个年代，人们就曾提出这类实验来试图找出答案，例如传教士是否——这听起来很蠢，那是因为你害怕对它进行测试——像传教士这样经常祈祷的好人是否会比其他人更少遇到海难。因此传教士要到遥远的国家去传教前，他们都会查阅资料看看传教士是否会比其他人更少遇到海难，结果发现没有任何区别。由此许多人不相信这有什么差别。

还有，如果你打开收音机——我不知道这里的情形如何，想必应该是相同的吧——加州的情形是你听得到各种借助信仰来治病的医生的宣讲。我在电视上见过他们。要解释清楚为什么这又是一个荒谬可笑的命题耗费了我不少精力。事实上，所谓受人尊崇的整个宗教教派，即所谓基督教科学教派，正是以通过信仰来为人治病为基础的。如果这真的有效，它可能早就确立了，用不着通过个别人的趣闻轶事来宣讲，而是通过仔细的检查，通过技术上好的临床疗法，就像治疗疾病的其他方法一样。如果你相信这种信仰疗法，你很可能就不会采用其他方式来治病。这可能会耽误你早点去看医生。有些人信得还挺深，那就会耽误更长的

时间才去看医生。信仰疗法有可能不是那么有效。还可能是——我们不能肯定——它根本就无效。因此相信信仰疗法很可能会带来危险，这不是闹着玩的，它可不像喜欢占星术那样无伤大雅，你相信只能在某些日子做某些事情仅仅只是带来一些不方便。最好是调查一下，我想知道——我们每个人都有权知道——相信基督的治病能力到底是使更多的人受到伤害还是有助于病情好转；这样的事情到底是带来更多的疗效还是更多的伤害。这两方面都是可能的，但需要调查。我们不应该没有调查就让相信它的人受到蒙骗。

广播里不仅有通过信仰治病的医生，还有教会播音员用圣经来预言各种将要发生的现象。我好奇地听到过有个人在梦中见到了上帝，并收到了给他那片教区信众的各种专门信息，等等，唉，这不科学的年代……对这种事情我真不知道该如何处置。我不知道要用什么样的推理能够很快证明那是有病。我想它只能属于那种对这个世界的复杂性缺乏基本了解，他们不了解这个世界是多么精致，像他们所讲的那些事情发生的可能性是多么微小。当然，在没有更仔细的调查之前我不能否定那些东西。也许有某种方法能够不断追问他们他们是怎么知道这是真的，并能够记住他们错了。无论如何，记住这一点就够了，因为您可能会因此捂紧钱袋不去送上太多的钱。

当然，这个世界上还有许多完全是因极其愚蠢而产生的现象是你没法搞定的。我们都做过蠢事，我们知道特别有些人做的蠢事更多点，但要试图证明谁做得最多是没用的。有过通过政府法令来保护这种愚蠢行径的，但不会百分之百地保护得到。

例如，我曾为了买地到过一处荒无人烟的地方。你知道他们卖土地是要推动将这片土地建成一个新的城市。这很令人激动，很了不起的。你一定得去看看。试想你站在一个什么都没有的荒原上，地面上插着旗帜，上面写着地段编号，旁边竖着有街道名字的牌子，那是一种什么感觉！你驾车驶过荒地找到第四街标号为369的地段，这就是你的地盘了，你会怎样想？你站在那里，踢着脚下的沙粒，一边与销售人员谈论着为什么买街角的位置合算，这里车道有多方便，哪边都可以进出。糟糕的是，你信不信吧，你发现自己已经转到讨论海滨俱乐部上去了，它该在哪一片海滩，入会需要什么样的规则，你可以带多少朋友前来，等等。我敢肯定当时我一下子就陷进去了。

因此到了你想买地的时候，你会发现州政府已经采取措施要为您提供帮助。他们印制了专门的说明书供你阅读，卖地的推销员会说，这是明文规定，我们必须给你这个供阅读。他们给你看说明，上面说，这里的地产交易与加州其他地方的做法无甚区别，等等。但在其他事项里我了解到，虽然他们希望能有5万人来这里住，但水源严重不足，缺口是多少我不好说，否则会被控涉嫌诽谤，但确实相差很多——确切的我记不得了——大概仅够5000人左右吧。当然这之前他们也注意到了这一点，因此告诉我们说他们刚刚在远处另一地点发现了水源，正在用泵将水引过来。当我问起这事时，他们非常小心地向我解释说，这个水源是

刚刚发现，还没来得及印上州政府颁布的小册子里。呜呼。

我再讲另一个类似的例子。有一次在大西洋城，我进了一家商店。里头有很多座位，人们正坐在那里听一个人讲话。他非常有趣，知道很多有关食品的事情，他正在谈论营养和其他什么事情。我记得他讲述了一些重要的东西，譬如“甚至蠕虫都不吃精白面粉。”诸如此类。他讲得很好，也非常有趣。这都是对的——也许关于蠕虫的部分讲的不是很对，但谈到蛋白质等部分都很对。接着他描述了联邦纯净食品和药品法，解释了这项法案是如何保护你的。他解释说，自称是好的保健食品的每一种产品都有助于你补充矿物质和这样或那样的营养，这些瓶子上都会有标签，告诉你它的成分、它的作用，所有说到的好处都会明确标出，因此，如果这里头有错，将会怎样怎样。他向听众说明了一切。我心里想：“他这样怎么赚钱呀？”接着他就拿出了瓶子。终于清楚了，原来他是卖这种特效保健食品的，东西当然放在一个棕色瓶里。说来也巧，他初来乍到，匆忙之间还没有来得及把标签贴上。这边是要贴到瓶子上去的标签，那边是瓶子，他急着卖药，于是一边给你瓶子，一边递给你标签让你自己贴上去。这家伙真是勇气可嘉。他先给你解释怎么做，担心什么，然后就现身说法这么做给你看。

我发现上一场演讲就有点与此类似。我指的是为我安排的第二场丹茨演讲。那场演讲一开始我就指出很多事情完全是不科学的，很多事情是不确定的，特别是政治上的事情。我说到两个国家——苏俄和美国——在互相争斗。经过一通神秘戏法，我们成了好人，他们成了坏人。然而在开始时，没有任何办法能决定哪个好哪个不好。事实上，这正是那一讲的重点。只不过我玩弄了点手段，从不确定中弄出某种相对确定性来。我刚刚跟你讲了瓶子和标签的事儿，然后我就走向另一端，将标签贴在了我的瓶子上。我是怎么做到这一点呢？你必须好好想一想。当然，有一点我们可以确定，那就是一旦我们不能确定一件事，那么我们感到不确定这件事本身就已经是不确定的了。有人说“不，也许我敢肯定。”而事实上，我在那一讲里摆的噱头，也就是整个事情的薄弱点，是这样的，本来需要进一步阐发和研究的事情却变成了这样：我慷慨激昂地呼吁大家注意我的观点，譬如说最好有开放的渠道，不确定性是有价值的，更重要的是允许我们去发现新事物，而不是选择我们现在给出的解决方案——选择一个解决方案，无论现在怎样选，比起我们等待事情有点眉目了再来确定的方案，肯定要差得多。而这正是我做出的选择，而且我不能确定这样的选择是否正确。看到吧，现在我已经把权威给破了。

这些问题都与缺乏相关的信息有关。但还有些现象，特别是在缺乏信息方面，我相信，要比占星术更为严重。

为了准备这次讲座，我调研了我住的城市的购物中心的一些事情。有这么一家店，门前挂着旗子。店名叫美国主义中心，奥塔迪纳美国主义中心。于是我走进美国主义中心想看看它是干什么的。原来这是一个志愿者组织。门外贴有美国宪法和人权法案等文件，还有一封信，内容

是解释这个组织的宗旨，是为了保障人权，等等，其行事都按照美国宪法和人权法案等原则。情形大致如此。他们做的工作纯粹是教育性的。他们有各种各样有关如何提高公民意识等的书供人们选购，除此之外也有其他书籍，譬如国会记录、国会调查等小册子，那些正在研究这些问题的人就可以读到这些。他们还有晚间活动的学习小组，等等。由于我也关注人权问题，于是我问道，我有一事不是很了解，我想问问这里有没有关于南部各州黑人的投票自由问题的书。没问题，有的，在那儿。随后就出现了一件事，我在拐角看到了两本书，一本是根据牛津城教父写就的密西西比掌故，另一本是一本小册子，上面有“全美有色人种和共产主义促进协会”的字样。

因为我想对此做些比较详细的了解，看看到底会发现什么，于是就跟女店员交谈起来。她解释了很多其他事情（我们谈了很多事情——气氛非常友好，你听了会感到惊奇），她说她不是伯奇协会[3]的成员，但知道一些有关伯奇协会的事情，看过一些这方面的电影，等等，因此可以谈谈这方面的东西。她说如果你加入伯奇协会，你就不会置身事外了。至少你知道你想要什么，因为如果你不想要的话你可以不参加进来，这是韦尔奇先生说的，是伯奇协会的入会方式。如果你相信这个你就该加入；如果你不相信这个，那么你不应该加入。这听起来就像共产党。在他们没有掌权时一切说得都非常好。但一旦有了权力，情况就完全不同了。我试图向她解释，这不是我们谈论的那种自由，在任何组织中，应该允许存在讨论的可能性。作壁上观是一门艺术，而且做起来挺困难；重要的是实事求是，而不是走向这个极端或那个极端。行动起来是不是就一定比作壁上观更好？不一定吧。如果你还不知道该朝哪个方向走，盲目行动只会更糟。

于是我在那里买了两件东西，随便挑的。一件是《丹·斯穆特报告》[4]——名字不错——谈的是宪法和我将要展开的一般性概念：原版宪法就很好，后来所有的修正案都是错的。原教旨主义不只是表现在对圣经的态度里，也表现在对宪法的态度里。接着书中按国会议员的投票以及他们投的是什么票对议员进行了评级。在解释了他们的想法之后，书中非常明确地说道：“下面按照国会众议员和参议员在支持还是反对宪法的表决时的投票对他们做一个评级。”我要提醒你，这些评级并不只是一种意见，而是基于事实。这个事实就是投票记录。事实，不掺和任何意见，只凭表决纪录。当然，每一项不是支持就是反对宪法。譬如医疗保险自然就是反对宪法啦，等等。我要说明的是，他们违反了自己的原则。根据宪法，投票是不言而喻的。但宪法没有假定事前自动认定哪些是对的哪些是错的。否则就不用麻烦成立议会来进行投票了。只要你有投票，那么投票的目的就只是试图让你下决心决定走哪条路。任何人都不可能事先确定会得到什么结果。因为那样就违反了宪法本身的原则。

伯奇协会开始时不错，有善、有爱、有基督，等等，它这么发展着直到遇到了可怕的敌人。然后它就忘记了原先的宗旨，整个倒了个个儿变得与初衷截然相反。我相信刚开始时那些行善友爱的人们，特别是奥塔迪纳的女志愿者，是怀着一颗善良的心，对它好的地方、宣传宪法等

有所了解才加入进来的，但在这个组织里他们被引入歧途了。具体如何我不太了解，怎样做才能避免这样，我也不确切知道。

我又通过进一步深入了解，搞清楚了这个学习小组到底是干什么的了。如果你不介意，我可以告诉你那是做什么的。他们给了我一些文件。房间里有很多椅子。他们向我解释道，是的，当晚他们是有个小组活动。他们给了我一件东西，上面描述了他们将要学习的内容。我记下了其中的一些内容。它与S.P.X.研究协会有关。1943年，S.P.X.研究协会——果然是……好吧，我告诉你它是干什么的——应运而生，它是美国军方现役情报人员针对苏俄启用长期休眠的第十作战原则而成立的。瘫痪、找茬、休眠，神秘，让人觉得可怕。自有罗马军团以来，执行军事命令的神秘人物都曾有过各种作战原则。第一条、第二条、第三条……这是第十条。我们不知道第七条是说什么来着。存在长期休眠的作战原则这种设想，何况还是第十条作战原则，是极其荒谬的。那么什么是瘫痪原则呢？他们怎么运用这一概念呢？这就要说到幽灵（boogieman）。你知道什么叫幽灵吗？你可以这么来考虑，这个教育项目就忙于这些事情：任何领域——农业、艺术、文化交流、科学、教育、新闻媒体、金融、经济、政府部门、劳动力市场、法律、医药、军队和宗教，这是最敏感的领域——都有可能被苏俄人用来瘫痪美国的抵抗意志。换句话说，我们现在有了这样一部开放的机器，任何持不同政见者都可以被指控为受到第十条作战原则的神秘力量的影响而处于精神瘫痪状态。

这是一种类似于偏执狂的现象。你不可能驳倒第十原则。唯一可能的是你有一定的思维平衡能力，对世界有一定程度的了解，懂得那种认为最高法院——这一沦为“征服全球的工具”——已经瘫痪的想法是一种思维失控的表现。你看这会变得多么可怕！一个又一个这种虚构的存在可怕力量的例子一而再、再而三地证明了这种活动能量的可怕。

这种事情说明了什么叫偏执狂。一个女人变得神经兮兮，她开始怀疑她丈夫正试图找她麻烦。譬如她不喜欢他进屋。但他还是想方设法要进屋，这正好说明他正在找她的麻烦。他找朋友来说服她。她知道这是个朋友，但她内心却偏激地认为这不过是进一步说明了他的可怕企图，只会强化她脑海里的惊恐。邻居们过来调解，劝了好一阵子，但没效，只好各自回去了。丈夫的那个朋友跑到邻居家想请他们再努努力。但他们都厌倦了。但她觉得他们会告诉她的丈夫她曾说过的所有可怕的事。哦，亲爱的，她怎么说的？他会利用他们来对付她。她打电话给警察局。她说，“我好害怕。”现在她把自己锁在房子里。她说，“我好怕。有人试图闯进屋子里来。”警察来了，想和她谈谈，他们认为没有人想闯进她的屋子。他们要回去了。这时她想起来她丈夫是这座城市里的重要人物。她记得他在警察局里有朋友。警察局也是这一阴谋的一部分。她的猜想再次得到了证实。她从窗口看出去，看到对面有人在一个邻居家串门。他们在说什么？她看到后院有什么东西在动。他们在用望远镜监视她！事后证明那只是一些小孩在后院里用木棍耍着玩。她就这样不停地胡思乱想，直到把所有人都牵扯进来。她想起来了，她叫的那位律师曾

是她丈夫的一个朋友的律师。那个一直在劝她到医院做检查的医生明显站在她丈夫一边。

因此，唯一的办法是保持一定的心理平衡，认识到不可能整个城市都跟她作对，不可能每个人都会注意到她丈夫的无助，人人都在忙着这件事，他们抱成团，所有邻居、每个人都恨她。这就过分了。但你怎么向一个不明事理的人解释这一切？

S.　P.X.研究协会就是这样的人。他们没有分寸感，相信存在苏俄第十作战原则这样的可能性。对于这种情形我认为要战胜对手的唯一办法就是，他们说得对。像我那位卖药丸让你自己贴标签的朋友那样，苏俄人的确非常非常天才和聪明。他们甚至告诉我们他们正在对我们做什么。你看，这些人，这些研究协会实际上正在步苏俄人的后尘使用这种瘫痪方法。他们希望我们做的就是对最高法院失去信心，对农业部、对科学家和对在各方面帮助我们的所有人失去信心。在所有方面失去信心。这就是那些已经加入并希望人人都加入自由运动的人所采取的方法。他们打着宪法的旗帜投机钻营，他们正在变得无处不在，他们正在使我们的国家变得瘫痪。证据？用他们自己的话说就是：S.P.X.研究协会有合法的手续，作为针对第十作战原则的美国主要权威机构在美国法庭上宣过誓。他们从哪儿得到信息？只有一个地方。就是从苏俄人那儿。

这种妄想症，这种现象——我不应该称之为偏执狂，我不是医生，我不懂——但这种现象非常可怕，它造成了人类和个人极其严重的不安宁。

同样的例子还有著名的犹太教长老议定书。这是一份伪造的文件。它可能是犹太老人与犹太教长老自发聚在一起炮制的一个统治世界的计划。国际银行家，听到了吧，国际的……多么庞大的一部机器！就是妄想得过头了。但它又没有过得太多以至于人们根本就不相信它，它还曾是反犹太主义势力发展中最强大的力量之一。

在许多方面，我所要求的只是保持一种基本的坦诚。我认为，我们在政治问题上应该有更谦卑的诚实。我认为那样我们会更加自由。

我要说人都是不老实的，科学家也一样不老实。这是没办法的事，没有人诚实可靠，科学家也不可靠。但人们通常认为他们是可靠的，这就使得情况变得更糟糕。这里说的老实可靠不是说你只能说那些真实的东西，而是指你弄清楚了整个局面。您能为那些聪明人提供他们下决心时所需要的所有信息。

例如，在核试验方面，我自己也不知道我是赞成核试验还是反对核试验。这两方面都可以列出各种理由。它造成放射性，具有危险性，而且还会将我们拖入战争。但你进行核试验到底是使战争的可能性增大了呢还是减小了，我不知道。到底是备战能制止战争还是不备战能制止战

争，我不知道。因此我对哪一方都不发表意见。这就是为什么我在这个问题上可以坦诚告白。

当然，最大的问题是到底存不存在放射性带来的危险。在我看来，核试验最大的危险和最大的问题是其对未来的影响。核战争造成的死亡和放射性要比核试验大很多倍。它对未来的影响也要比现在产生的少量的放射性远远重要得多。但多少才算是少量放射性呢？有放射性总是不好的。没人知道一般放射性的正面效果。因此，如果你增加了大气中的放射性水平，那你就是在生产不好的东西。因此从这个角度说，核试验是在制造不好的东西。如果你是一个科学家，那么你就有权利并且应指出这一事实。

另一方面，这件事情是可以量化的。问题是多少才算是不利？您可以玩游戏，显示在未来两千年里你将杀死一千万人。如果我在汽车前面走，我希望将来能有更多的孩子。你也可以通过某种算法算出我会在今后一万年里杀死一万人。问题是这种作用有多大？上一次……（我真希望——我本该检查一下这些数字，让我换一种说法。）下一次你听演讲时，可以提问我要告诉你的下面这些问题。因为我上次听演讲时问了些问题，我能记住演讲者的回答。但我最近没有检查这些数字，所以我拿不出任何数字，但我至少可以问这样一个问题，那就是从不同地域的放射性变化上看，放射性的增幅到底有多大？木质结构建筑的背景辐射量和砖石结构建筑的有很大的不同，因为木材的放射性要比砖石小得多。

当时我问的问题的答案是，核试验引起的对整个环境的影响变化要小于砖结构建筑与木结构建筑背景辐射量之间的变化。而且海平面的放射性强度与5000英尺高大气中的放射性强度之间的差别更是要比原子弹核爆试验所产生的额外放射性至少大上100倍。

现在我要说，如果一个人是绝对诚实并希望保护民众免受辐射伤害（这正是我们的科学家朋友经常说他们正在做的事情），那么他应当把工作重点放在上述最大数字方面，而不是最小数字方面。他应当指出，生活在丹佛城里所吸收的放射性是如此严重，是核爆背景辐射的100倍，因此所有丹佛人都应该转移到低海拔地区。其实实际情形——如果你住在丹佛，不必害怕——并不严重，没有多大差异。这只是一个很小的影响。我相信核爆带来的影响要比不同地域海拔高度差带来的影响还要小，但我不能完全确定。我请你们提问以便搞清楚的这个问题是：是否就因为放射性的缘故，你会像设法阻止核试验那样十分小心地不走进红砖建筑物？当然，从政治上考虑，反对核试验还可以有许多很好的理由。但那是另一个问题了。

在科学的事情上，我们正变得越来越多地与政府打交道，在各方面也越来越缺乏老实态度，特别是在对不同行星的探险和各种空间探险活动的报告和描述中缺乏这种诚实的态度。举一个例子，我们不妨以探测金星的水手二号探测器为例。[5]这是一件非常令人振奋的事情，一件了不起的事情，人类已经能够从地球上将一个东西发送到4000万英里以外的

另一个地方。而且离它是那么近，可以在2万英里之外得到它的图像。这种兴奋让我难以言表，真是太有趣了。我已经超时了。

在这次探测期间发生的故事也同样有意思，令人兴奋。先是机器出了故障。地面控制人员不得不将所有仪器关闭一段时间，因为太阳能电池板不能正常工作，整个卫星有可能失去控制。后来太阳能电池恢复正常，又能够继续供电了。接着又出现探测器过热问题。不是这个出点毛病就是那个不正常，然后又恢复工作。新探险所遇到的所有事故和兴奋都尝遍了，就像哥伦布或麦哲伦环球航行，遇到过哗变，遇到过各种麻烦，还发生过海难，不一而足。这次探测确实是个激动人心的故事。例如，当出现过热时，有人写文章说，“这是过热现象，我们正好可以从中学习。”我们能学到什么？如果你对此懂点，你就会知道你学不到任何东西。你把卫星发射到近地轨道上，你知道它从太阳那里能接收多少辐射……我们知道这一点。当卫星飞临金星时又得接受到多少辐射呢？这都有绝对精确的定律可依，这就是著名的平方反比律。你离得越近，光线就越强。这很容易。因此，为了调节温度需要在星体上漆上多大的黑白比例是很容易弄清楚的事。

我们唯一学到的是，它出现过热，不是由于别的什么原因，而是整个发射工作太过匆忙，一直忙到发射前的最后一分钟；内部仪器老在改，结果探测器内部集聚了过多的热，超出了原设计所容许的范围。因此，我们学到的不是科学的收获。而是在这些事情上要学得仔细一点，不要这么匆忙，到最后一分钟心里还老想着调整。也是奇迹使然，探测器飞临金星时，所有仪器基本上都正常了。按原计划，探测器应当在绕金星做轨道运动时飞临金星21次，拍摄下如同电视画面那样的图像。实际只成功了3次。这已经很好了，堪称奇迹。这是一个了不起的成就。哥伦布曾说过，他做环球航行是为了黄金和香料。但他没找到黄金，找到的香料也很少。但这次发射确实是一个非常重要、非常激动人心的时刻。人们原本希望水手能够传回重要的科学信息，结果并没有，我告诉你没有。过会儿我再来纠正这种说法。实际上它近乎没有。但它是一个了不起的、令人兴奋的经验，而且对未来会有更多的影响。他们在文章里说，从对金星的观察来看，云层之下的表面温度高达800摄氏度。这已是众所周知的了。今天，我们用帕洛玛望远镜在地球上就可以测得金星的这一温度，现在不过是进一步得到了证实。何等的聪明！同一信息在地球上观察就可以获得：我有一个朋友，他就有这方面的资料。他的房间里有一张很漂亮的金星地图，上面有表示不同地区的冷热和不同温度的等温线，非常详细，就是从地球上得到的，不是仅有3块带高低示性的区域而已。这次飞行有一件斩获值得指出——金星与地球不同，周围没有磁场——这一信息是地球上不可能得到的。

在从这里到金星的途中还有许多非常有趣的信息。应当指出，如果你不是要发射探测器到一个行星上去，你就不必在其中安装额外的校正装置，不用加装额外的火箭来重新驾驶它。你只管把它发射出去就完了。你可以安装更多的仪器，更好的仪器，对探测器内部空间利用进行更精心的设计。如果你真的想在地球与其他行星之间的空间里找到什么

有用的信息的话，你不必花力气奔着金星去。如果最重要的信息来自行星际空间，而我们又希望得到这样的信息，那么就让我们再发送一个卫星上去，它没有必要飞向某个行星，也没必要加装与此相关的各种复杂设备。

另一个是徘徊者号探月卫星项目[6]。我生病了，当我在报章上读到前后5次发射结果是一次接一次的失败时，我真是非常的难受。每一次我们学到了一些东西，然后却不继续沿该方向走下去。我们得到的教训非常多。这次是有人忘记了关闭阀门，下一次则是有人让沙子跑进了仪器。有些时候我们学到了一些东西，但在大多数时候我们只知道问题出在我们的工业界、我们的工程师和科学家身上。计划失败了，而且失败了这么多次，没有一个合理、简单的解释。就我所知，我们完全不必出现这么多次失败。这一定是在组织上、在行政上、在工程上或在这些仪器的制造等环节上出了什么问题。重要的是要认识到这一点。知道我们一直在学习是远远不够的。

顺便说一句，有人问我，为什么要到月球上去？因为这是科学上的一次伟大的探险。顺带指出，它也是一项技术开发工作。你必须制造出登月用的所有这些仪器——火箭等——因此技术开发也是非常重要的。此外登月还使科学家感到高兴。如果科学家们高兴了，也许便会弄出些军事上有用的东西来。另一种可能是直接将太空技术军事化。我不知道该怎么做，也没人知道该怎么做，但事实证明是存在这种使用可能的。不管怎么说，这都是可能的：如果我们将登月用的长程运载技术继续朝着军事方面发展，也许有助于遏制苏俄将某些我们尚未掌握的技术转为军事用途，从而建立起间接的军事优势。也就是说，如果你能制造出更大的火箭，那么你可以直接用它们从地球这边打到地球那边而不必登月。另一个好的理由是宣传上的。让对手在某些技术领域取得领先已经让我们在世界面前丢了脸。正好我们可以就此将脸面找回来。所有这些理由单独来看都不足以解释我们为什么要登月。但我相信，如果把所有这些理由合在一起，再加上其他一些我没想到的原因，理由就充分了。

嗯，我算打中要害了。

我想谈谈另一个问题，就是你如何获得新想法。这是同学们最感兴趣的了。你如何获得新想法呢？通常你会通过类比，但我要说用类比会使你经常犯大错。我们不妨回顾一下过去，在那些不科学的年代，看看都有些什么东西，然后再看看我们现在是否有同样的东西，如果有的话在哪里？我想这么做一定挺有趣。首先，我们拿巫医开刀。巫医说他知道如何治病。病因是你体内有魂灵正在试图跑出来。你必须用鸡蛋将它们驱除出来，等等。他们将蛇皮披在病人身上，再从树皮里取些个奎宁。奎宁起效了。但他不知道他用的是错误的理论来解释。如果我在部落里正好有病，我去看巫医。他对此道知道得比其他任何人都多。但是我总想告诉他，他不知道自己在做什么。当某一天，人们可以自由自在地调查事情真相，并摆脱他的那些复杂概念的时候，他们将学到很多更好的办法。当今谁是巫医？自然是精神分析学家和心理学家。如果你看

看他们在极短时间里发展起来的那些复杂概念，再比较一下任何其他科学领域里从一个概念发展到下一个概念要经过的漫长时间，你就会明白精神分析和心理学是怎么回事。试想所有那些结构、发明和复杂的事情，本我与自我，张力和应力，推和拉，等等，我告诉你，它们不可能一股脑地全出现在那里。没人能在这么短的时间里炮制出这么多的新概念来。不过我提醒你，如果你身在其中，除了接受还真没法可想。

现在我可以来点更有意思的，是专门讲给你们大学的学生听的。我曾认为，在中世纪，阿拉伯学者对科学是有贡献的。他们自己做过一点科学研究，这不容否认。但他们写了很多关于前人的评论，写了很多评论这些评论的评论，彼此之间你写我我写你，不断地写这些评论。写评论是文化人的一种病态。传统是很重要的。但新思路、新的可能性的自由发挥则在“已有方法要比我能够想得出来的更好”的口实下被否定掉了。我没有权力改变这一切，无权发明任何东西或思考什么事情。那么，今天的这种人则是你的英语教授。他们沉浸在传统之中，他们写评论。当然，他们也教我们或我们中一些人的英语。这是类比不起作用的地方。

现在，如果我们在这里继续运用类比，我们看到，如果他们有更富启迪的世界观，那么就会出现许多有趣的问题。譬如说，现在有多少种词类？咱们要不要再发明一种词类？噢——我不应乱说！

那么词汇又当如何呢？我们的单词是不是太多了？不，不，我们需要用词来表达思想。那么我们的词汇是不是太少了？不，机缘凑巧，在时间的长河里，我们恰好发展出了一种完美的构词法。

现在，让我在较低水平上问这个问题。这就是，你总听到这样的问题：“为什么约翰尼不会识读？”答案是，因为拼写。两千年前，甚至更早的三四千年前，腓尼基人已能够从他们的语言中整理出一套描述声音的符号系统。它非常简单。每种读音对应于一个符号，每一个符号对应于一种读音。所以你看到符号就能知道它怎么读。这是一个了不起的发明。但在这之后，事情有了变化，英语变得失控了。我们为什么不能改变拼写？如果不是英语教授做这事还有谁能做？如果英语教授会向我抱怨说，来上大学的学生经过这么多年学习还不能拼写“friend”，我会对他们说，问题出在你拼写“friend”的方式上。

此外，如果他们想辩解，也许会这么说，这是一个事关语言风格和美感的问题，如果创造新词和新的词类，这种风格和美感就可能遭到破坏。但他们解释不了拼词与风格之间到底有什么关系。其实这根本就与什么艺术形式或文学形式无关，只有拼字游戏是唯一的例外，其中拼写会造成风格的差异。即使是拼字游戏，也可使用不同的拼写。如果英语教授不来做这件事情，如果我们给他们两年时间还一点动静都没有——请不要发明三种拼写方式，一种就好，大家都习惯了——如果我们等了两三年还没有任何反应，那么我们就要去问问语言学家了，因为他们知道如何做到这一点。您知道吗？他们可以用字母写出任何一种语言，这

样当你听到它时，你就可以知道它在另一种语言里是如何发声的。这真的很有意思。因此，单就英语来说，他们应该能够搞定。

我还有一件事情要留给他们。业已证明，用类推来争辩存在很大的危险。我们应该指出这些危险。但我没有时间做这些了，所以我把指出类推引起的推理错误留给你的英语教授去处理。

有很多东西，正面的东西，是科学的推理起作用的，并且在这方面取得了很大进展，前面我挑出了很多负面的东西。我想让你们知道我赞赏积极的东西。（我也明白我说的太长了，所以我这里只能提及一下这些东西。但这样显得正负不成比例了。我真想多花些时间。）有许多事情，理性的人们正通过很有道理的方法在非常努力地进行着。但还没人注意到这一点。

例如，人们已安排好交通系统，交通路况的安排在其他城市一样会奏效。刑事侦破在如何获取证据、如何判断证据、在证据面前如何控制自己情绪等方面已经处于相当高的水平。

在考虑人类的进步时，我们不仅要考虑到技术性发明方面，对那些数量巨大且相当重要的非技术性发明也不能忽视。例如，在经济学领域，我们发明了支票、银行以及诸如此类的东西。国际金融安排等更是了不起的发明。它们是绝对必要的，代表了一种伟大的进步。再譬如会计系统。商业会计就是一种科学的过程——我是说也许它不属于科学，但却是一个理性的过程。法律制度也已逐步发展起来。我们有了陪审团和法官制度。当然，其中还有很多不足和缺陷，为此我们必须继续努力加以改进，但这不妨碍我对它表示钦佩。政府机构的发展也已进行多年，在某些国家，大量问题已经得到解决，其采用的方法有些我们可以理解，有些还不能。我要向你提到一件事，它一直让我搞不懂，这就是政府对军队的实际控制问题。历史上大多数时候遇到的麻烦便是强大的军队试图控制政府。不掌握军权的人可以控制掌握军权的人，这很神奇，是不是？罗马帝国遇到的困难也正是这一点：禁卫军比议院更强大。而且这个问题似乎没法解决。然而在我们国家，我们有一套约束军队的纪律，使得他们永远不能试图直接控制议会。人们取笑军方高级将领，随时拿他们开涮。无论有多少事情让他们如鲠在喉，我们这些平民仍能够控制军队！我想是军队的纪律让他们知道自己在美国政府中的位置，这一点正是我们的一项伟大遗产，是我们非常有价值的东西之一。我不认为我们应当对他们如此苛责，除非他们不耐烦，要摆脱自我施加的纪律。不要误解我的意思。军方像其他任何方面一样也有很多缺点。他们处理安德森先生（我觉得是这个名字，就是那个谋杀同胞的人）的方式就是一例。如果让他们接管权力，还不知道会发生什么事情。

现在，如果我们展望未来，我想谈谈力学的未来发展。存在这样一种可能性，就是当我们实现了聚变控制的时候，我们几乎就摆脱了能源危机。在不久的将来，生物学的发展将会带来前所未见的问题。生物学的迅猛发展将会引起各种非常令人兴奋的问题。我没时间讨论这些了，

因此只能请你们有时间去读读赫胥黎的书《美丽新世界》，那里面给出了未来生物学可能会带来的种种问题。

关于未来，有一件事情我很看好。那就是很多事情都趋势向好。首先，有越来越多的国家愿意彼此倾听，相互交流，即使它们也想塞耳不闻。各种观点流行，因此很难将不同观点拒之门外。并且，苏俄人压制像纳霍廖索夫这样的人而引发的麻烦正是我们希望能够继续发展的方向。

还有一点我想花一点时间说得清楚点：正如我前面所说，道德价值和伦理判断的问题不是通过科学能解决的问题，而且对此我也不知道该说什么。然而，我看到一种可能性。可能还存在其他可能性，但我只看到一种可能性。你看，我们需要某种机制，就像先做观察再来相信它那样的机制，用来作为道德价值的取舍方案。在伽利略时代，关于是什么让一个物体落下去曾引起很大争论，对介质、推力和拉力等存在各种各样的争论。伽利略的做法是，撇开各种争论不管，只确定物体是否下落，下落得有多快，只描述过程，由此赢得了所有人的共识。继续沿这个取得所有人共识的方向研究下去，尽可能不理会是什么机制在起作用，用什么理论来做解释。然后慢慢地，随着经验的积累，你会发现这背后也许存在令人比较满意的其他理论。在科学发展的早期，激烈的争论不一而足，例如关于光的争论。牛顿通过一些实验证明，光束被分开，而且用棱镜分开的光束永远不会再次分离。他为什么要与胡克争辩呢？那是因为当时有一套光的理论。他不是争辩这种现象是否正确。胡克拿起棱镜一看，便明白这是事实。

所以，现在的问题是我们能否有就道德问题做一些类似的事情（和类比工作）。对后果达成共识，在最终结果上达成一致，暂不问原因，不问我们是否应该做，我相信这不是完全不可能的。在基督教初期也存在争论，例如当时就争论过耶稣的身体是用类似于上帝的东西造的还是与上帝是同一种东西造的，译成希腊文后，这个问题变成了Homoiousions（本体相类论）和Homoousians（本体同一论）之间的争论。不要笑，有人正因此被伤害，有人声誉扫地，有人被杀，无论无非就是相同还是相似。今天，我们应该从中汲取教训，在取得共识时别再争论为什么会取得共识的原因。

因此，我认为教皇约翰二十三世的通谕（我读过）是我们这个时代最重要的事件之一，是迈向未来的一大进步。我找不到比通谕里更好的字眼来表达我对道德信念、对人类的义务和责任、一个人对他人的义务和责任的理解。也许我不同意其中对一些思想的解释，譬如它们来自上帝，等等，我个人不认为是这样，我也不认为其中的一些思想是以前历届教皇思想的自然产物，透着自然和明智。我不认同，但我不会嘲笑它，也不会与它争辩。我同意教皇所代表的责任和义务就是人民的责任和义务。我认为这篇通谕也许是新的未来的一个起点，在这样一个未来里，只要我们的最终目的一致，只关注如何采取行动，相信同样的事情，我们就不必牢记着我们为什么会相信那些事情的理论。

非常感谢。我很开心。

关于理查德·费曼

1918年，理查德·费曼出生于纽约的布鲁克林，并于1942年在普林斯顿大学获得博士学位。尽管很年轻，但在第二次世界大战期间，他在洛斯阿拉莫斯的曼哈顿工程中却有着重要作用。后来，他前后在康奈尔大学和加州理工学院任教。1965年，他因量子电动力学方面的工作，和朝永振一郎（Sin-Itero Tomanaga）以及施温格（Julian Schwinger）共同荣获诺贝尔物理奖。

费曼博士因为用量子电动力学理论成功解决了许多问题而荣获诺贝尔奖。他还为解释液氦的超流现象提出了一种数学理论。这之后，他与默里·盖尔曼（Murray Gell-Mann）一起，在β衰变等弱作用领域进行了奠基性的工作。在随后几年里，费曼在发展用于解释高能质子碰撞的部分子模型中起到了关键的作用。

除了这些成就，费曼博士还将新的计算技术和符号系统引入到物理学——这就是独一无二的费曼图，这个图，近代科学史上大概无出其右者，改变了对基本物理过程进行理论化和计算的方法。

费曼还是一位杰出的卓有成效的教育家。他一生获奖无数，但最让他引以为豪的是1972年荣获的奥斯特教学奖。初版于1963年的《费曼物理学讲义》被《科学美国人》杂志的书评家描述为“艰深但内容丰富、充满趣味的教科书，25年来，一直是教师指南和大一学生最好的入门教材。”为了增进普通百姓对物理学的了解，费曼博士写了《物理定律的本性》和《QED：光和物质的奇妙理论》。他还写作了一系列高级读物，这些著作已经成为研究人员和学生的经典参考书和教材。

理查德·费曼是一位富于建设性的知名人物。他在挑战者号调查委员会的工作举世闻名，尤其是他关于O型密封圈的低温敏感性的示范性实验，做得极其优雅，所需条件仅仅是一杯冰水。相比之下，他于20世纪60年代在加州大学课程委员会对教科书的平庸提出抗议的事则显得不那么为众人所知。

对理查德·费曼的众多科学和教育方面的成就的罗列并不能充分展现他的本质。甚至是读过他的最专门的学术著作的人都知道，费曼活泼的和多才多艺的个性闪现在他的所有作品中。除了作为一名物理学家，他还经常修理无线电、修锁，他不仅是一位艺术家和舞蹈家，还是一名邦戈鼓鼓手，甚至会破译玛雅象形文字。他对世界永远充满好奇，他是一位模范的经验主义者。

1988年2月15日，理查德·费曼在洛杉矶与世长辞。

译后记

本书原名叫The Meanin go fit All（《一切的意义》），是费曼于1963年在华盛顿大学所做的三次演讲的实录。费曼以其特有的风格纵横捭阖，议题遍及科学与宗教的关系以及对政治对社会等现象的看法。尽管由于年代的原因，很多具体内容显得有点陈旧，但贯穿三篇演讲的主旨在今天依然有其现实意义。这就是科学的怀疑精神、做事的求实态度和区分真善的能力7。由于演讲中谈及很多政治，尤其是对共产主义的认识，措辞不无商榷性，翻译时本着尊重原貌的原则，未加删改，希望读者能从当时背景出发，正确理解作者的本意。另外，原书末附有词汇索引。由于本书浅显易懂，因此除个别名词术语涉及历史掌故以译注形式注出之外，译本不附该索引中文译名，请见谅。

[1]语出《圣经·马太福音》第5章第39节："不要与恶人作对。有人打你的右脸，连左脸也转过来由他打。"——译注

[2]beatification，宣福礼。罗马天主教里教皇昭告死者已得到真福的宣言式。此为死者获得封圣地位的第一步，自此便可开始接受信众的朝拜。——译注。

[3]John Birch Society，美国的一个极右翼政治团体，创立于1958年，创始人为小罗伯特·韦尔奇。该组织政治上持传统保守思想，支持私有产权，强调法治和美国的主权原则，反对全球主义。该组织以约翰·伯奇命名是为了纪念1945年遭共产主义信仰者杀害的美国军事情报官约翰·伯奇。——译注，摘自http：//en.wikipedia.org/wiki/John-Birch-Society

[4]Dan Smoot Report，是美国联邦调查局特工和保守的政治活动家丹斯穆特自20世纪50年代始到70年代初出版的一系列报告，内容主要是指控共产主义对美国政府和社会各界的渗透。——译者，摘自维基百科http：//en.wiki pedia.org/wiki/Dan-Smoot

[5]水手二号探测器是美国于1962年8月27日发射的第二个水手系列探测器，该探测器成功掠过金星从而成为人类第一个成功接近其他行星的空间探测器。在经历了108天、2.9亿千米的飞行之后，水手二号于当年12月14日接近金星并拍摄下了红外及微波波段的图像。根据其发回的数据，科学家们估计金星上覆盖着厚达60千米的二氧化碳大气层，金星表面温度大概在425摄氏度。从1962年始到1973年止，美国宇航局先后共计发射了10个用于行星探测的水手系列探测器。——译者摘自维基百科http：//zh.wikipedia.org/zh-cn

[6]Ranger program，美国于20世纪60年代进行的系列探月工程项目，目的是通过无人太空飞船在月球表面着陆来得到月球表面图像。截至费曼演讲之时，前5次发射均以失败告终，不是发射失败，就是错过了月球或尚未工作即被撞毁。1964年以后的4次发射（从模组3的徘徊者6号到徘徊者9号）均告成功，在撞击损毁前向地球传回了高质量的电视画面。——译者摘自维基百科http：//en.wikipedia.org/wiki/Ranger-program

[7]费曼的另一书What Do You Care What Other People Think（《你干吗在乎别人怎么想》，湖南科学技术出版社，2005年）中包括的一篇演讲《科学的价值》，主旨相同，可以进一步欣赏。——编者注

QED THE STRANGE THEORY OF LIGHT AND MATTER

QED:光和物质的奇妙理论

Richard P. Feynman

【美】R·P·费曼/著 徐一鸿/序 张钟静/译

R・P・费曼（1918～1988）是加州理工学院的物理学教授。1965年，他因量子电动力学方面的研究荣获诺贝尔物理学奖。



走近费曼丛书

C'S | 湖南科学技术出版社

版权信息

QED：光和物质的奇妙理论

作者：【美】R.P·费曼

湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
2006年版引言
讲座前言
编录者序
致谢
1.绪论
2.光子：光的粒子
3.电子和它们的相互作用
4.松散的结尾

2006年版引言

我们是怎样终于认识了光，这个故事的演进简直就是一出充满了命运的纠结、曲折、逆转的扣人心弦的活剧。

光子，在所有基本粒子中是最可见的：试想在一个晴天，你置身于一个灰尘弥漫而开着一扇小窗的房间，盯着看一大群小灰尘颗粒在急匆匆地满屋子乱飞乱舞。牛顿很自然地认为，光是由粒子（“微粒”）流组成的。但他对此已经有一些怀疑；甚至就是在17世纪，光的衍射也已经能够很容易地被观察到。最终，衍射和其他现象看来毫无疑问地表明光是一种电磁波。19世纪物理学的那座丰碑——麦克斯韦电磁学方程组——阐明了光完完全全就是一种波。接着，爱因斯坦出现了，他以光是小能量包（量子）之总和的假设解释了光电效应。这样，“光子”这个词和光的量子理论诞生了。（这里，我就不再离开主题去回顾爱因斯坦那著名的对量子力学的不待见，尽管他曾为量子力学的诞生助产过。）20世纪20～40年代那段时间，物理学家们彻底弄清楚了物质（“大量原子”）的量子行为。而光的量子行为和光与电子的相互作用是更大的难题，困扰着像保罗·狄拉克和恩里科·费米这样最棒的、最聪明的著名人物。物理学不得不充满着悲喜交加的情绪等待三位年轻人——费曼、施温格和朝永振一郎，因为根据他们在第二次世界大战时的经验，这种情况很可能会产生出量子电动力学（亦称QED）的正确的系统阐明。

理查德·费曼（1918～1988）不仅是一位杰出的物理学家，他还是个非同寻常的人物，那极其张扬的个性在理论物理学界可说是空前的，此后也还没有同类。理论物理学家们偶尔也消磨一点悠闲的时光来比较比较费曼和施温格的贡献，他们俩都是来自纽约的犹太好男孩，刚好又几乎是同龄。这些比较没什么意义，也没什么目的；不过有一点倒是事实，即朱里安·施温格是个羞涩的腼腆谦和的人（不过藏在他冷淡外表后面的是一副很温暖很善意的好心肠）；而Dick费曼（Dick是本文作者为作为偶像的费曼杜撰的名字——译注）则性格极其外向，天生一个传奇人物的坯子。他的手鼓，他的秀女郎，他的由大批崇拜者热情培育起来的相当有文化品位的其他一些标志性的偶像特征形象，使得费曼无疑问地成为仅次于爱因斯坦的最受爱戴的理论物理学家。

才华横溢的苏俄物理学家列夫·朗道曾为理论物理学家的高下排行制作了一个著名的对数标度尺，爱因斯坦高居榜首。大家也都知道，朗道在系统阐释相变理论之后把他自己提升了半步。我则有我自己的标度尺——作为一个消遣吧，把我所知道的理论物理学家或按容貌风度，或按精神气质做了个排序。哦，这是真的：很多理论物理学家单调乏味得要命，令人生厌得就像刷碗水，在我的这个对数标度尺上他们接近于负无穷。我把薛定谔（关于他，我们后面还要谈到）标在最高点，费曼无悬念地紧随其后。我不能告诉你我把自己置于这个标度尺之何处，但可以

说在可供我支配运用的我的天资和能力的范围内，我确实尽最大可能地去寻开心找乐趣。

但是，费曼是何等有趣之人！在我开始工作之初，费曼约我和他一起去夜总会。费曼的一个同事告诉我，这个邀请表明费曼是很认真地把我当做一个物理学家看待了，但当我热切地告诉他我关于杨-米尔斯理论的想法时，他却只想听我对于台上正在跳舞的女孩儿的大腿有什么评论。当然，根据英雄崇拜心理学，没有人会对一个玩手鼓、喜欢秀女郎的物理学家汉子发出两种不同的声音，给出两个不一致的看法。那么，好！我的衡量物理学家的标度确确实实就是：他有多么有趣好玩乘以他的天赋才华——朗道的标度尺有他好玩的成分在里面，如爱因斯坦的股票下跌而他朗道的股票上涨（朗道很喜欢开点玩笑搞点恶作剧，直到他被克格勃给抓起来）。

现在，距那次夜总会共赏节目大约30年之后，普林斯顿大学出版社的Ingrid Gnerlich竟要求我为费曼的名著《QED：光和物质的奇妙理论》2006年版写个引言，这让我感到非常荣幸。首先我要坦言：此前我从未读过《QED》。在这本书1985年出版时，我刚刚完成我的第一本物理学普及读物《Fearful Symmetry》（《可怕的对称》，有中译本——译注）我多多少少认同这样一个策略，即不读他人写的物理学普及书，以免我的风格受到他们的影响。这样，我以清新的眼光和深深赞赏的态度读了Ingrid寄来的《QED》。我是立刻就喜欢上了这本书，边读边记下来我的想法和评价。

早先没读这本书真是个错误，因为它不是通常意义上的物理学普及读物。1984年史迪夫·温伯格曾建议我写一本通俗物理书，并安排我和他的编辑在纽约见面，他还给了我一个有用的忠告。他说，很多写这类书的物理学家都禁不住力图对有关的一切作出解释；而外行们想要的不过是一个理解的假象，他们只想抓住几个似是而非全无意义的词语，好在鸡尾酒会上到处播撒以显摆自己懂行而已。此为电子书版本。

我想温伯格这个话虽然有点尖刻，但大体上是对的。大家都见证了霍金的《时间简史》的巨大成功（依我上面讲的策略，这本书我也一直没有读）。我在加州大学这里过去的同事、现在在牛津大学执教的一位卓越的物理学家，一次他给我看《时间简史》那本书里的一句话。我们俩一起努力咂摸这句话，想揣摩出个讲得通的意思来，却到底还是不知所云。与这种情况相比照，我想让所有感到困惑的读者放心，费曼这本书虽然看起来异乎寻常到了极致，但其中所有句子的意思都清楚明白。不过对每句话你都必须认真仔细地琢磨，努力弄懂费曼在说什么，再往下读。否则，我保证你会绝望地败下阵来。此书讲的是奇特的、与众大不相同的物理，而不是做一般的陈述。毕竟，书名已经做出了承诺，给读者讲一个“奇妙的理论”。

费曼就是费曼！他写书所选择的路子与温伯格给我的忠告（顺便说一句，我也并没完全按他的建议去做；见下面我关于群论的说明）完全

相反。在书的“致谢”部分费曼谴责有的物理学通俗读物“看起来相当简洁，只是由于它们所写的东西与它们声称要写的是两码事，它们对于声称在写的东西作了相当大的歪曲”。与之不同，费曼向自己提出了挑战：为外行读者不走样地、不“对真理作任何歪曲”地讲解QED。这样，你们就不应该把这本书当成标准的物理学普及书。它也不是教科书。它是一个珍稀的混血儿。

为了解释这是哪种类型的书，我将运用费曼自己做的（我只稍加修改）类比。根据费曼的说法，要学习QED，你有两个选择：或者去完成7年的物理专业教育，或者读这本书。（他这个7年的数字可能有点高估；如今一个聪明的中学毕业生在适当的指导下用不了7年就能做到。）其实，也不是真让你去做个什么抉择，对吧？当然你应该选择读这本书！即使你像我所建议的那样，把所有的句子都仔细抠明白了，也花不了你7周的时间，更不用说7年了。

那么，这两种选择不同在哪里呢？现在来看我的版本的类比：一个玛雅高级神父宣布，他收些学费就可以教你（玛雅社会里的一个普通人，叫Joe或Jane）如何将两数相乘（如564乘以263）。他让你记住九九表，然后告诉你看这两个数最右边你须把它们先乘起来的两个数字，即4和3，他再让你说在九九表的第4行第3列的数是什么。你说12。然后，你要学到的是，你应该写下2并且“进”1（不管它意味着什么）。接着，你要说出第6行第3列的数，即18。他会告诉你将此数加上你刚刚进位的那个数。当然，你还必须再花一年的时间来学怎么“加”。好了，你明白这意思了。这就是你在一所声名显赫的大学里交了学费之后所学到的东西。

然而，一位叫费曼的聪明人向你建议说：“嘘……如果你会数数儿，你不必非得学关于进位和加法这套高难度的专业知识。你要做的就是弄来564个罐子，然后往每个罐子里放入263个小卵石。最后，你把所有这些小卵石倒出来，堆成一大堆，数一数有多少，那就是答案。”

所以你看，费曼不仅教你怎样做乘法，他还让你深刻地理解那些高级神父和他们的学生们（这些学生很快会从知名大学获得博士学位）究竟在做什么！但另外一方面，如果你学费曼的方式做乘法，你就不能申请会计师的工作。如果你的老板要你整天作大数乘法运算，你就会给累死，而进了高等神父学院的学生们将会让你灰头土脸蒙羞受辱。

我已经写过一本教科书（《Quantum Field Theory in Nutshell》《果壳里的量子场论》，下称《果壳》）和两本物理学普及读物（包括《可怕的对称》，下称《可怕的》），所以我觉得我很有资格就你们关心的要读什么样的书的问题说几句话。（顺便说一下，《QED》这本书的出版者普林斯顿大学出版社出版了《果壳》和《可怕的》两书。）

现在我把这个引言的读者分为三类：（1）受这本书的激励想进一步学习并掌握QED的学生；（2）对QED感到好奇的聪明的外行和（3）

像我本人这样的专业物理学家。

如果你属于第一类，你将会令人难以置信地受到这本书的鼓舞、激励而迸发出巨大的热情想要即刻开始阅读一本量子场论的教科书（可以很有理由地说《果壳》就是这样的一本教科书）。顺便说一下，如今QED被认为是量子场论的一个相对简单的例子。在写《果壳》的时候我坚信，一个确实聪明的本科生是会很接近于学懂了量子场论的，而费曼肯定会同意我这个想法。

但是，正如在类比中所表明的，光阅读这本书可无论如何不会使你变为一名教授的。你必须还要学习费曼所谓的两数相乘的“复杂棘手、需要技巧、但很有效的方法”。尽管费曼宣布，他很想从零开始解释一切，但他在行文中还是明显地表现出吃力。比如在第74页和图56中，仅仅提了一下P（A至B）取决于间隔I，这让人莫名其妙，但你只能接受他这句话。而在《果壳》中，这是被推导出来的。在第102页注③中讲的E（A至B）也是这样。

如果你属于第二类读者，坚持读下去，你会受益匪浅，相信我！别着急贪多。即使你只读完前两章，你也会已经学到了很多东西。为什么这本书这么难读？我们可以再回到那个玛雅人类比：这就好像你正在用罐子和小卵石教某人学习乘法，但他甚至连罐子和小卵石是什么都不知道。费曼翻来覆去地告诉你每个光子带一个小箭头，告诉你怎么把这些小箭头加起来和用伸缩、旋转的方法把它们乘起来。而这真是让人非常困惑、感到糊涂的；你的注意力不能有一点点走神。附带说一下，这些小箭头其实就是复数（如第61页注④所解释）；如果你已经了解了复数（即罐子和小卵石），讨论就可能比较清楚一点而不那么太乱。或者，也许你是温伯格所描述的满足于“似乎是理解了某事物”这种假象的那种典型的外行读者中的一员，你就可能满足于标准的物理普及读本。再次用玛雅人类比：一本标准的物理普及读本既不会拿九九表和进位，也不会拿罐子和小卵石去烦劳你。他可能就简单地说一句：当给定了两个数，高级神父有办法得出另一个数。事实上，通俗物理书籍的编辑们坚决要求作者们按这种方式去写作，目的是不要吓跑了掏钱买书的大众（下面会更多地谈到这一点）。

最后，如果你是第三类读者，那你真可说是来享受一番东道主的款待。虽然我是个搞量子场论的理论物理学家而且明了费曼正在做的是什么，但我还是从看到大家都熟悉的现象以这样一种令人眩惑的原创性的为大家所不熟悉的方式给解释出来，而获得巨大的快乐。我欣赏费曼向我解释光为什么走直线，或者一个聚焦透镜实际是怎么工作的（第46页：“对自然界耍一个‘花招’”，让沿某些路径的光慢下来，以使所有的小箭头都转同一大小的角度！）

嘘……我来告诉你，费曼为什么与众多物理教授不同。你去请一位物理教授解释，光从一块玻璃板反射时，为什么只考虑前后两个表面的反射就足够了。很少有人知道答案（见第87页）。这不是因为物理教授

们缺乏知识，而是因为他们就从来没有提出过这个问题。他们只不过是学习Jackson的标准教科书，通过考试，按部就班地升级。费曼从小就不是省油的灯。他永远在问为什么？为什么？为什么？

有三类读者（励志的学生、聪明的外行、专业的教授），相应地，也有三类物理书（并不与三类读者一一对应）：教科书、通俗读物和我可以称之为“超难普及物理读本”的。这本书就是这第三类书的珍稀样本，在某种意义上这第三类夹在教科书和通俗读物两大类之间。为什么它在三类中占的份额如此之小？这是因为“超难普及物理读本”把出版者吓个半死。霍金有个广为流传的说法：通俗书中每一个公式都会使该书的销量减少一半。虽然我并不否认这个话确实道出了一般的实情，但我希望出版商还是别这么轻易地给吓着。问题主要并不在于公式的数量有多少，而在于书中是否蕴含了对难于掌握的概念做出的真诚可信值得称赞的讲解。在写《可怕的》一书时，我想，为了讨论现代物理学中的对称，讲解群论是必要的。我想尽力使这些概念能为大家所接受，为此，我用在上面写有字母的方形和圆形的小代币筹码似的东西作为教具来演示。但编辑迫使我一次再次不断地冲淡这些内容，直到实际上啥也没留下为止。然后，把刷掉的许多内容归到附录中。费曼可不同，他神通广大，不是所有的物理书写作者都有他那么大的本事，那么大的影响力。

让我返回到费曼的书，讲讲它的难点。这本书的很多读者都会学一些量子物理。这样，他们理所当然地会，比如说，对这本书没有谈到波函数感到不解，而波函数在大量其他量子物理通俗论述中都占有相当突出的地位。量子物理是足够让人困惑的——正如一句俏皮话所说，“有量子物理相伴，谁还需要迷幻药？”也许应该让读者不要在困惑中再为这些不解而更加挠头，所以我来解释一下。

埃尔文·薛定谔和维纳·海森伯，几乎同时但相互独立地创立了量子力学。例如，为了描述电子的运动，薛定谔引入了波函数，它服从一个现在叫薛定谔方程的偏微分方程，而海森堡则让他周围的人都莫名其妙地大谈算子——作用在他称之为“量子态”上的算子。他还令人瞩目地阐明了不确定性原理，这个原理是说，一个人若更精确一些地测定了，比如说，一个量子粒子的位置，那么他关于这个粒子的动量的知识就会更加不确定一些，反之亦然。

由这两个人建立的理论形式显然大不相同。但是，对任何一个物理过程他们所得到的最终结果都是一致的。后来表明这两个理论形式是完全等价的。如今，对一个合格的本科毕业生，我们都可以指望他从一个理论形式熟练地转入到另一个形式，他采用哪种形式取决于他手头所要处理的问题用哪一个更方便。

六年以后，1932年，保罗·狄拉克提出了——以某种程度的原生态面貌——第三个理论形式。看来狄拉克的思想多半是给遗忘了，直到1941年才又被重新提起，这时费曼发展了并详尽阐述了这个理论形式，即现在大家所知的路径积分形式或对历史求和形式。（物理学家们有时很想

知道费曼是不是在完全不知道狄拉克工作的情况下发明了这个理论形式。物理学史家现已确认，答案是：否。在普林斯顿一个小酒馆的派对上，一位名叫Herbert Jehel的访问物理学家将狄拉克的这个想法告诉了费曼，而就在第二天费曼就在可敬可畏的H.Jehel面前完善了这个理论形式。见《Reviews of Modern Physics》（《现代物理学评论》）中S.Schweber的论文）。

费曼在这本小书里努力讲解的就是这个理论形式。例如，在第35页，当费曼把所有箭头加起来时，他实际上是在把与光子从点S到达点P所有可能的路径相关的振幅进行积分（当然这是求和的微积分学专业术语），于是名之为“路径积分”。另一个名字“对历史求和”也很容易理解。如果把量子物理的规则关联到宏观的人类尺度的事物，那么历史事件的所有其他选择（如拿破仑在滑铁卢大获全胜，或肯尼迪避开了暗杀者的子弹）都是有可能发生的，而每一个历史事件都会有一个振幅与之相关联，我们将把这些振幅都加起来（即把所有那些箭头都加起来）。

原来——可被看做是终态函数的路径积分满足薛定谔方程。这个路径积分实质上就是波函数。这样，路径积分理论形式就与薛定谔和海森伯理论形式完全等价。事实上，一本明白无误地讲清了这个等价性的教科书就是由费曼和Hibbs写的。（确实，费曼也写教科书——你知道，那些令人生厌的书实际上就是告诉你如何高效率地做例如“进位”和“加法”这类事情。对，还有，你也会正确地猜测出费曼的教科书通常主要都是由他的合作者写的。）

由于狄拉克-费曼路径积分形式与海森伯的形式完全等价，那它就相当肯定地包含了不确定性原理。所以，费曼在第61页上兴高采烈地“泯没”不确定性原理就显得稍夸张了些。至少，人们可以从语义学的角度提出问题：他所说的不确定性原理就不再“需要”了，是什么意思？其实，真正的问题是它是否还有用。

理论物理学家是众所周知的很讲求实用的一群人。哪个方法最简便，他们就会采取哪个方法。一点儿没有数学家坚持严格和证明的那种矫情。无论什么方法，只要能用就行，管他呢！

如果是这样的工作态度，那你会问，这三种理论形式——薛定谔、海森伯和狄拉克-费曼，哪一种最简便？回答是：这要取决于所要处理的问题是什么。比如在处理原子问题时，正如大师自己在第83页所承认的，“这些原子的（费曼）图中所包含的直线和波纹线太多，以致完全乱成一团”。薛定谔形式则绝对简便多了，那物理学家就采用薛定谔这个方法：事实上，对于大量“实际”问题，几乎涉及不到路径积分形式，在某些情况下则完全不可能运用路径积分。一次，我就这类显然不可能用路径积分的一个例子向费曼发问，他没有回答我。但是，初学的学生运用薛定谔形式很轻松地解决了这些貌似不可能解决的问题。

这样，哪个理论形式最好，这确实是取决于要解决的物理问题是什

么，一个领域的物理学家——比如，搞原子物理的——可能喜欢一种理论形式，而另一个领域的——比如，搞高能物理的——可能偏爱另一个理论形式。可以合理地推想，当一个领域展开和发展起来，甚至有可能出现这样的情况，即一个理论形式逐渐显现出比另一个更为方便。

作为一个具体的例子，我来着重谈谈我所受业的领域，即高能物理，或称粒子物理，这也是费曼的主要领域。有趣的是，在粒子物理中，路径积分形式在三种形式的赛马中很长时间内都是远远落在后面的第三名。（顺便说上一句，没有什么东西表明只可能有这三种理论形式。某个聪明的年青人很可能研究出来个第四种！）事实上，对于很多问题的处理，路径积分形式使用起来很不顺手，以至于直到六十年代末，它还陷于默默无闻的状态。六十年代末之前，量子场论的教学几乎完全都是采用正则形式，它只不过是对海森伯形式的另一个说法，但正是“正则”这个词透露出这个形式得到了最高的尊重。举我恰好熟知的一段往事作为例证。在我求学期间，从没有听说过路径积分，即使我的本科和研究生上的是东海岸相当知名的两所大学。[我所以提到东海岸是因为，就我所知，在洛杉矶东部的飞地上（指加州理工学院吧！——译注），路径积分可能一直在作为重点来讲解。]直到我在普林斯顿高等研究院做博士后时，我和我的很多同事才通过一篇俄文论文第一次注意到路径积分。甚至就在那时，一些权威人物还是表达了他们对这种形式的质疑。

令人啼笑皆非的是，正是费曼本人要对这种可悲可叹的事态负责。问题出在学生们很轻易地学会了费曼发明的“好玩的小示意图”（如第96页的图）。施温格有一次不无抱怨地说“费曼把量子力学搞乱了”，他的意思是任何一位能记得几个“费曼规则”的蠢材都可以自称是懂得场论的理论家，并以此为可靠基础构建自己的学术生涯。Heavens to Betsy，（这是十九世纪的说法，早已成为罕用语，有“天哪，真是不可思议”之意。——译者）代代都有学了费曼图而不懂场论的人，至今还依然有这样的大学教授在到处逛来逛去。

但是，几乎是让人难以置信的——而且这恐怕是费曼魅力之部分所在，这种魅力使得他的学术生涯充满了几乎是魔幻般的氛围，在1970年代初，大体上是由我上面刚刚提到的那篇俄文论文开始，狄拉克-费曼积分山呼海啸般地卷土重来。它很快就成为促进量子场论向前发展的占主导地位的方法。

我刚刚提到的这场“心智较量”发生在采用费曼图的一伙人和采用费曼路径积分的较年轻的一伙人之间，使费曼成为非凡物理学家的正是这场较量。我得赶紧补充一句，所谓“较量”这个词稍微重了点，没有什么东西限制物理学家只准采用这个方法而不准采用那个方法。我就两者都用。

我相信，我最近出版的教科书《果壳》是从最开始就采用路径积分形式的为数不多的几本书之一，相形之下，较老的教科书则偏爱正则形

式。我将第二章第一节的标题立为“教授的噩梦：一个聪明的家伙在课堂上”。根据关于费曼的那些全部是虚构的传奇的总精神，我杜撰了一个聪明调皮学生的故事，并给他起名叫费曼。路径积分形式是通过参禅式冥想的过程得到的——即先引入无限多的屏板，再在每个屏板上钻无数个洞，直到屏板全无为止。但对照玛雅神父的类比，在这个费曼式的推想之后，我还必须得教学生如何进行实际的计算（“进位”和“加法”）。为此，我得放下这个虚构的费曼，而详尽地完成路径积分的狄拉克-费曼推导。这要引入诸如“插入1（1是作为对左矢和右矢的完全集的求和）”这样的技巧。技巧是你通过阅读费曼的书所得不到的。

顺便讲一讲，也许你想知道，符号左矢“<”和右矢“>”与虚构的Dick费曼没有任何关系。它们是沉稳寡言的保罗·狄拉克当做一个括号的左半边和右半边引进来的。狄拉克本人是个传奇。有一次，我和他还有别人一起吃晚饭，自始至终他没说几个字。

费曼在他的书中插一些话，有点调皮地挖苦其他物理学家，几次引起我的窃笑。例如，在第111页，他打趣地称盖尔曼——一位杰出的物理学家，费曼在加州理工学院的亲密的比肩同道——是“伟大的创造者”。他有点一反他自己精心培育的聪明人的形象，在第113页及128页的注④很懊恼物理学家们掌握古希腊知识的水准普遍下降，虽然他完全知道盖尔曼不仅创造了“胶子”这个新词，更是个颇有造诣的语言学家。

我也还很喜欢费曼那些自嘲的言辞，这也是他的形象很重要的部分。在第125页，当费曼说到“有个愚蠢的物理学家1983年在加州大学洛杉矶分校上课时……”，一些读者可能不知道他这是在说他自己！虽然这确实只是费曼形象的一个侧面，但我发现，在我们这个理论物理学家圈子变得越来越等级森严傲慢自负的时代，它是一股清新的风。我所了解的费曼（我必须强调我并不是非常了解他）肯定不喜欢这个趋势。无论怎么说，毕竟，有一次他力图辞去国家科学院院士，还引起一阵轩然大波。

现在返回来谈谈上面所描述的我想象中可能大体分为三类的读者。我想说的是，第二、三类读者会非常喜欢非常欣赏这本书，但此书的真正本意是写给课堂上的学生的。如果你有志成为理论物理学家，我极力主张，以你藏于心智中的如饥似渴的求知欲，把这本书大快朵颐地吃起来，咽下去，然后就继续从量子场论教科书中学习如何实际地“进位”。

你肯定能够掌握量子场论。就记住费曼所说的话吧：“一个笨人能理解的东西，其他人也能理解。”他指的是他自己，还有你！

徐一鸿（A.Zee）

2006年

讲座前言

这个“阿莉克斯·毛特纳纪念讲座”（Alix G.Mautner Memorial Lectures）是为了纪念我的妻子阿莉克斯而设立的，她于1982年逝世。阿莉克斯的专业是英国文学，但她在很长时期里对许多科学领域一直保持经久不衰的兴趣。因此，以她的名义设立一个基金会，资助这样一个每年一次的系列讲座，向聪明而有兴趣的听众传播科学精神和成就，看来是很合适的。

我很高兴理查德·费曼同意由他开始这第一个系列讲座。我同他的友谊可以追溯到五十五年前，在纽约的法罗卡威（Far Rock鄄away）我们一起度过的童年时代。理查德认识阿莉克斯有二十二年了，而且她总是请求他想办法通俗地讲解“小粒子”物理，使她和其他非物理学家能够理解。

此外，我愿意在此向所有那些对阿莉克斯·毛特纳基金会做出贡献而使这些讲座得以开设的人表示感谢。

莱昂纳德·毛特纳

（Leonard Mautner）

洛杉矶，加利福尼亚

1983年5月

编录者序

理查德·费曼以他看待世界的独特方式在物理学界成为传奇式的人物：他对任何东西都不想当然地认可，总是独自彻底地考虑和解决问题，他经常能对自然界的行为得到一种新颖而深刻的理解——而且以令人耳目一新的简洁优美的方式表达出来。

费曼为学生讲解物理学的热情也是众所周知的。他拒绝了无数颇有声望的学会和组织的邀请，但对路过他办公室的学生请他去某个地方中学的物理学会讲点什么，他却着迷似的有求必应。

这本书是一个冒险——就我们所知，还从来没有人试着冒这种险。它以直接了当、真诚可信的方式对非专业的听众讲解了一个相当困难的课题——量子电动力学（quantum electrodynamics）。它的设计是为使有兴趣的读者欣赏一种思维方式，就是物理学家在要解释自然界如何运行时所采取的思维方式。

如果你准备学习物理学（或者正在学呢！），那么这本书中没有一点内容是你最终要纠正或抛弃的：它的讲述是个完整的大纲，其中每个细节都是精确的，你可以按照这个大纲——无需任何修改——进行更深入的学习。如果你已经学习过物理学，本书则向你揭示，你过去在做所有那些复杂计算的时候，到底是在做什么！

理查德·费曼还是个孩子的时候，受过一本书的启迪而开始学习微积分，这本书的开头语是：“一个笨人会做的事，其他人也会做。”费曼也想把同样的话和他的这本书一起奉献给读者：“一个笨人能理解的东西，其他人也能理解。”

拉尔夫·莱顿

（Ralph Leighton）

帕萨迪纳，加利福尼亚

1985年2月

致谢

这本书号称是我在加利福尼亚州立大学洛杉矶分校主持量子电动力学讲座时的记录，由我的好朋友拉尔夫·莱顿整理、编辑。但实际上，本书稿对原讲座做了相当大的修改。莱顿先生在教学和写作方面的经验，对于我们想试着通过本书把物理学的核心内容介绍给范围更广的读者，起了相当大的作用。

许多“颇受欢迎”的科学普及之类的作品之所以看起来相当简洁，只是由于它们所写的东西与它们声称要写的是两码事，它们对于声称在写的东西作了相当大的歪曲。但是对我们论题所怀的敬意不允许我们也这样干。经过许许多多个小时的讨论，我们已经尽力做到了最大限度的明确、简洁而同时避免任何对真理的歪曲。

QED：The Strange Theory of Light and Matter

Copyright©Richard P.Feynman，1985

湖南科学技术出版社通过博达著作权代理有限公司获得本书中文简体版中国大陆地区出版发行权。

著作权合同登记号：18-2010-092

1.绪论

阿莉克斯·毛特纳对物理学很好奇，常常要我给她讲解。我想，这事我能应付得来，正如在加州理工学院有一群学生每星期四到我这里来花一个小时讨论物理问题我能应付得来一样。可结果，我最感兴趣的这部分却没成功：我们老是在讨论量子力学那些古怪的概念时给窘倒了。我告诉阿莉克斯，我不能只花一个小时或一个晚上把这些概念给她解释清楚——这需要花很长时间，但我答应她，总有一天我会准备一个系列讲座来讲解这个课题。

我准备了几讲，然后去新西兰试试如何——因为新西兰反正远得很，即使讲砸锅了，也没什么了不起。噢，新西兰人认为讲得还不错，所以我猜这讲座还可以——至少对新西兰是这样。现在我在这里讲的就确实是我为阿莉克斯准备的讲座，但很遗憾，现在，我不能直接讲给她听了。

我愿意给大家谈的是物理学中已经为人所知的部分，而不是未知的部分。人们总是要求我们讲解“统一”——把这个那个理论统一起来这一类工作的最新进展，而不给我们机会向他们讲解我们已经掌握得很好的一个个理论。他们总是想了解我们尚不知道的东西。所以，与其用一些半生不熟、我们尚且一知半解的理论把你们弄得晕头转向，还不如像我所愿意的那样给你们讲一讲一个我们已经分析得通透至微而彻底掌握了的课题。我喜欢物理学的这个领域，而且认为它是绝妙的——那就是量子电动力学，或简而言之，QED。

我这几讲的目的是尽可能准确地描述关于光和物质的奇妙理论——或者更明确地说，是关于光与电子的相互作用。要讲完我想讲的所有内容，需要很长的时间。好在我们分四次讲，我会好好利用这些时间，把所有内容都弄清楚。

物理学在过往的历史中，尝试将众多现象综合为很少几个理论。例如，在早期，人们观察到运动的现象和热的现象；还有声、光和重力的现象。但在牛顿（Sir Isaac Newton）解释了运动的规律以后，人们很快发现，这些过去看起来毫不相干的现象，其中有些其实是同一事物的侧面。例如，声音现象完全可以理解为空气中原子的运动。所以声音就不再被看作是运动之外的什么事了。人们还发现，从运动规律出发，热现象也是容易理解的。用这个方式，一大堆物理学理论被综合成一个简明易懂的理论。不过万有引力理论除外，它不能用运动规律来理解，甚至在今天它也还是与其他理论毫无联系。迄今，万有引力仍不是借助其他现象所能理解的。

在把运动、声和热这几种现象综合起来之后，人们又发现了我们称

之为电现象和磁现象的几种现象。1873年，这些现象同光和光学现象被麦克斯韦（James Clerk Maxwell）的一个理论综合在一起，麦克斯韦提出光就是电磁波。所以在这个阶段，有运动定律、电和磁的定律和万有引力定律。

1900年前后，一种解释物质到底是什么的理论出现了。它被称为物质的电子理论——认为原子中有很小的带电粒子。这个理论逐渐演化发展，认为原子中有一个重核，并有电子绕它旋转。

人们想借助力学定律，就是说想仿照牛顿利用运动定律探究出地球如何绕日运行的办法来理解电子绕核旋转，这个努力是彻底失败了：它做的所有预言都是错的。（附带说一句，相对论大致也是在这段时间里提出来的，你们大家都把它理解成是物理学中的一场革命。但与牛顿运动定律不能用于原子这个发现比起来，相对论只是个小修正。）建立另一个体系取代牛顿定律花费了很长时间，因为原子水平上的现象是很奇怪的。要领悟在原子水平上发生的事情，人们必须抛弃常识。最后，在1926年，用来解释电子在物质中的“新型行为”的一种“非常识性”理论建立起来了。这个理论看来好像荒诞不经，但事实上当然绝非如此：它就叫做量子力学。“量子”这个词是指自然界那个违背常识的特别的一面。我准备和你们谈的，就是关于这一面的问题。

量子力学的理论还解释了所有各类现象的细节，例如为什么一个氧原子和两个氢原子合成水，等等。这样，量子力学就也为化学提供了背景理论。所以说基础的理论化学实际上就是物理学。

量子力学由于能够解释物质所有的化学性质和其他各种性质而获得极大的成功。但关于光和物质的相互作用还是存在问题。就是说必须将麦克斯韦的电和磁的理论加以改造，使之与已经建立起来的新的量子力学相适应。这样，在1929年，一个新的理论——关于光和物质相互作用的量子理论——终于由一些物理学家建立起来了。它的名字倒是怪可怕的，叫做“量子电动力学”。

但是这个理论曾有过让人头疼的麻烦。如果你粗略地进行计算，这理论能给你相当合乎逻辑的结果。但要是想进行更精确的计算，你会发现修正值（你原以为计算越精确，修正值会越小吧！例如一系列的修正值中，下一个会比上一个小）事实上很大——事实上竟然是无穷大！原来，这个理论不允许你把任何一个量计算得超过一定的精度。（此为电子书）

顺便说一下，刚才我给你们概括讲的那些，我把它称为“物理学家的物理学史”，这种物理学史从来是不正确的。我刚才给你们讲的是物理学家给他们的学生讲的形式化的神话故事一类的东西，学生又把这些讲给他们的学生。我刚才讲的这些不一定同真实的历史发展有什么联系，说真的，我并不大知道真实的历史过程到底是怎样发生的。

无论如何，我还是要接着讲这段“历史”。P·狄拉克（PaulDirac）利用相对论建立了电子的相对论——不过他没有把电子与光相互作用的影响考虑在内。狄拉克的理论是说，电子有一个小的磁矩——就像是一个小磁体的力那类东西，它的强度正好为某种单位制的1个单位。后来，大约到了1948年，实验发现实际值应该是接近于1.00118个单位（小数点后最后一位数的不定度约为3）。当然，电子要与光相互作用，这是众所周知的，所以有某个小修正值正在意料之中。人们还期望这个修正值从量子电动力学这个新理论的观点看来也是可以理解的。但计算的结果，这个修正值不是1.00118，而是无穷大——经验告诉我们，这结果是错的！

好了，在量子电动力学中如何进行计算这个问题被J·施温格（Julian Schwinger）、朝永振一郎（Sin-Itiro Tomonaga）和我本人于1948年前后解决了。施温格是第一个使用一种新的“壳层游戏”（shell game）计算这个修正值的。他算出的理论值是1.00116，与实验值已经相当接近，这说明我们的思路是对的。最后，我们终于有了可以用来进行计算的关于电和磁的量子理论了。我打算给你们讲的就是这个理论。

量子电动力学的理论到现在已经经受了五十多年的检验，检验的条件越来越广泛、检验的精度越来越高。现在，我可以骄傲地说，在实验和理论之间，不存在重大分歧。

这里我给你们几个最近得到的数据，让你们领略一下这个理论如何备受艰辛地通过检验：狄拉克数的实验值是1.00115965221（小数点后最后一位数的不定度大约为4），而理论值为1.00115965246（不定度约为实验误差的五倍）。为了使你对这个精确度有个概念，我给你打个比方：如果你在测量洛杉矶到纽约的距离时精确到了这个程度，那你就是精确到了人的一根头发那么细。在过去的五十多年里，量子电动力学就是这样从理论和实验两个方面精巧灵敏地经受着考验。顺便说一句，我刚才只是举了一个数据给你们看。实际上量子电动力学中，其他东西的测定值也差不多是这样精确，它们与理论值同样符合得相当好。这个理论的内容一直在非常大的尺度范围内——从地球大小的一百倍到原子核大小的百分之一——经受着考验。我介绍这些数据是为了吓唬你们，迫使你们相信这个理论大概不会太差。下面，我会给你们讲这些计算是怎么做的。

对于量子电动力学所描述的现象，其范围之宽广，我想再一次加深你们的印象。反过来说容易点，让我反着说：它能描述物理世界的所有现象，只是万有引力作用——那种把你们束缚在椅子上的作用（实际上，现在把你们束缚在椅子上的是万有引力再加上你们的礼貌，我想）——和放射性现象（它们涉及到核的能级跃迁）除外。这样，如果我们把万有引力和放射性（更恰当地说，是核物理）除开不算，剩下来的是什么呢？汽车中汽油的燃烧、发泡起沫、盐或铜的硬度、钢的刚性。事实上，生物学家正在尽其所能地借助化学对生命做出解释，而正如我已经说过的，化学背后的理论就是量子电动力学。

我必须澄清一件事：在我说物理世界的所有现象都可以用这个理论解释时，我们并不真的知道是不是这样。我们所熟悉的大部分现象都涉及极大量的电子，要我们这贫乏可怜的头脑去跟踪如此复杂的事物，那可太难了。在这种情况下，我们可以运用这个理论粗略地估算出什么情况应该发生，并粗略地估算出在这种复杂的环境中，真真正正发生的到底是什么。但是，如果在实验室里安排一个在简单的环境下只涉及仅仅几个电子的实验，我们就可以很精确地计算出什么情况可能会发生，而且也可以很精确地把它测量出来。我们无论何时做这种实验，量子电动力学的理论总是表现得很好。

我们物理学家老是在检验，查看这个理论是不是有什么毛病。这种查看是一种游戏，因为如果真有什么毛病，那就很有意思了！但到目前，我们还没发现量子电动力学有什么问题。所以我可以说，它是物理学的珍宝——我们最骄傲的财富。

量子电动力学还是那些试图解释原子核现象的新理论的原型。如果你想把物理世界设想成一个舞台，那么演员可不只是原子核外的电子，还要有核内的夸克、胶子等等——数十种基本粒子。虽然这些“演员”的亮相一个与另一个大不相同，但它们的表演却都依照一定的风格——奇怪而特别，这就是“量子”风格。在这个系列讲座的最后，我要讲一点关于核粒子的内容。而在此之前的大量的时间，我只打算讲光子——光的粒子——和电子，以使内容保持简而不繁。因为正是它们作用的方式才是重要的，而且是很有意思的。

现在你们已经知道我打算讲些什么了。下一个问题是，你们会理解我将要给你们讲的内容吗？去参加科学讲座的所有听众都清楚，他们不打算理解讲座的内容，但是，讲授者也许系了一条色彩鲜艳的漂亮领带可供观赏。在我这里，那可就错了！（费曼没结领带。）

我准备给你们讲述的是我们对研究生院三、四年级的物理系学生讲授的内容——你们以为我把这些内容解释给你们，你们就能理解吗？不！你们别打算能够理解它。那么，为什么我还要用所有这些东西来打扰你们呢？如果你们不可能理解我准备给你们讲的东西，为什么你们还要从头到尾坐在这儿听呢？我的任务是什么——我的任务就是要你们相信，不要由于你们不能理解就走开。你们该知道，我的物理系研究生也不理解它。而这是因为我本人也不理解它。没有人理解它。

关于“理解”，我想稍微讲几句。在我们讲课时，有许多原因使得听众不理解讲授者所讲的内容。一个原因是，讲授者的语言糟糕——他词不达意，或是讲得颠三倒四，这当然使听众难于理解。不过，这是小事，我会尽最大努力来避免我的纽约口音过分浓重。

另外一个可能性是——特别当讲授者是物理学家时，他们经常以稀奇古怪的方式运用一些普通的词，例如，他们常常在本专业的意义上使用“功”呀、“能”呀——甚至，你将会看到，他们还使用“光”呀这类的

词。所以当我在讲物理学上“功”的时候，它的意思和我在街头巷尾谈论的“功劳”的“功”可不是一回事。在这个讲座中，我也许会使用一个这类的词而没注意到我不是以它通常的意义在使用它。我将尽最大的力量使自己警觉这个问题——这是我的任务。不过，这是个容易犯的错误。

你们可能以为你们不懂我在给你们讲什么的另一个原因是，在我描述自然界如何工作时，你们不懂得自然界为什么这样工作。但是你们要知道，没有人懂得这一点。我不能解释自然界为什么以这样奇特的方式行事。

最后，还有一种可能性：在我讲了一些内容之后，你们就是不能相信它，你们不能接受它，你们不喜欢它。一个小小的障碍落下来，你们就不再听下去了。我在对你们讲述自然界是怎么样的——而如果你们不喜欢它，你们就要按照你们的方式去理解了。物理学家学会了正确对待的正是这样一个问题：他们学会了承认，对于一个理论，他们喜欢与否无关宏旨。重要的是这个理论所给出的预言能否与实验符合。一个理论是否在哲学上令人喜爱，或是否容易理解，或是否能从常识的观点看来完全合乎逻辑，所有这些都无所谓。从常识的观点来看，量子电动力学描述自然的理论是荒唐的。但它与实验非常符合。所以我希望你们按自然界本来的面目接受自然界；它本来是荒唐的，就接受它是荒唐的。

我怀着很大的乐趣向你们讲述这个荒唐，因为我发现做这事很愉快。请你们不要由于不能相信自然界如此奇怪而背过脸去。你们且把我的讲座听完吧；我希望在讲座之后，你们能像我这样喜爱这个学科。

我准备怎么样给你们讲那些我对三年级以下的研究生都不讲的内容呢？让我用类比的方法说吧！玛雅印第安人对作为“晨星”和“昏星”的金星的升起和落下很感兴趣——他们对这颗星何时出现感兴趣。多年的观察之后，他们注意到在地球观察到的金星五个周期的时间与他们按365天为“一年”的8年的时间很接近（他们知道真正的回归年并不是365天，而且对此也做了计算）。为了进行计算，玛雅人发明了点画系统来表示数（包括零），他们还有计算规则。根据这些规则，他们计算并做出预言的不仅有金星的升落，而且有天上的其他现象，如月蚀。

在那个时候，仅有少数玛雅神父会做这种精巧的计算。好！假设我们准备问一位神父，在计算金星下一次何时会作为晨星而升起时，其中的一步——两数相减怎么个作法？让我们设想，和今天的情况不同，那时我们不上学，不知道什么是减法。这位神父会怎样对我们解释减法是怎么回事呢？

他可能教我们由点和画所表示的数和“减”法规则，也可能告诉我们他正在做的到底是什么：“假定我们想从584中减去236。先数出584粒豆子，把它们放到一个罐子里，然后从这些豆子里数出236粒放在一边。最后数数罐子里还剩下多少豆子。这个数就是584减去236的结果。”

你也许会说：“我的上帝呀！多没意思的工作呀——数豆子，把它们放进去，再数一些出来——真无聊！”

对此，神父可能会回答说：“这就是为什么我们对点画要订些规则。这些规则微妙复杂，但用它们得到答案比一粒一粒地数豆子可有效率多了。重要的是，如果我们所关心的就只是答案的话，那么怎么得到这个答案是无所谓的：为预言金星出现的时刻，我们可以数豆子（这很慢，但易于理解），或者使用复杂微妙的规则（算起来很快，但你必须花上几年在学校里学习这些规则）。”

要理解相减是怎么个做法——只要你不是非得真把它算出来不可——确实并不那么难。所以，我的想法是：我要给你们讲，在物理学家要预言自然界将如何动作时，他们在做的是什么，但不打算教你们任何运算“窍门”，因为“窍门”只是在高效率地运算时才有用。你们会发现为使用量子电动力学这个新体系来做出合乎逻辑的预言，非得在纸片上画出多得吓人的小箭头不可。这需要七年的时间——四年大学和三年研究生——才能把我们物理系的研究生训练得会用这个复杂微妙而有效率的方式进行计算。我们准备也就是在这个地方，跳过这七年的物理训练：我给你们讲量子电动力学只讲我们到底在做什么，我希望你们理解得比我们的一些学生还好些。

我们再进一步看看玛雅人这个例子。我们可能问这位神父，为什么金星的五个周期大约等于2，920天，或者说8年呢？要回答这个“为什么”，恐怕会有形形色色的理论。比如，“20在我们的计算系统中是个重要的数。如果用20去除2，920，你会得到146，这个数比用两个不同方式得出的平方相加起来多1”等等，诸如此类。但这些理论与金星实际上毫无关系。在现代，我们发现这类理论一点用处都没有。所以我再说一遍，我们不打算讨论大自然为什么以她现在这种独特方式运行这类问题。没有什么好的理论能够解释这一点。

迄今我所做的，是使你们有个正确的态度来听我讲课。不在这里讲，我们就没有机会讲了。好，这些已经讲完了，言归正传吧！

我们从光开始讲起。牛顿在开始研究光的时候，他发现的第一件事就是白光是色光的混合。他用棱镜把白光分解为色光，但他在令一种色光——例如红光——通过另一个棱镜时，发现再进一步分解就不可能了。这样，牛顿就发现了，白光是不同色光的混合，而每一种色光都是纯的——就是说不可能再进一步分解了。

（事实上，一种特定的色光还可以以另一种不同的方式，根据所谓的“偏振（或极化）”【polarization】再分解一次。不过，不考虑光在这方面的性质对理解量子电动力学的特征不是什么太严重的问题。所以为简化起见，我把它省略掉——其代价是，我将不能把这个理论给你们做一个绝对完整的描述了。无论如何，这个小小的简化不会影响到对我所要讲的内容的真正理解。当然，对所有我略去不讲的东西，我肯定还要

十分小心地告诉大家。）

在这个讲座中，当我说“光”的时候，我的意思并不仅仅是指我们所能看见的从红到蓝的光。原来，可见光只是长长的光标度尺上的一部分。这可以同音阶做个类比，有的音调高于你所能听到的，有的则低于你所能听到的。光的标度也可以用数（叫做频率）来描述——当数字越来越高时，光就从红而蓝、而紫、而紫外。我们不能看见紫外光，但它可以影响照相底片。它也还是光，只是（频率的）数字不同。（我们不应该太狭隘：能用我们自己的仪器——眼睛——直接探测的东西，并不是世界上仅有的东西！）如果我们再这么继续改变这个数，就会达到X射线、γ射线等。如果朝着另一个方向改变数字，我们就会由蓝而红、而红外（热）波、而电视波、而无线电波。对我来说，所有这些都是“光”。以后在举例时，我打算主要以红光为例，但量子电动力学的理论适用于我上面所说的整个范围，它是所有这些各种不同现象背后的理论。

牛顿认为光由粒子组成（他把它们叫做“微粒”），他是对的（不过他做出这个结论的推理是错的）。我们之所以知道光由粒子组成，是因为我们使用一种非常灵敏的仪器，当光照射这个仪器时，仪器就“嗒”“嗒”作响。如果光变暗了，声响还是那么强，只是响的次数少了。这样看来，光就有些像雨点——每一小团光就叫做一个光子——如果所有的光都是同一种颜色的，那么所有“雨点”的大小都是一样的。

人的眼睛是很好的仪器：只需五、六个光子就能刺激一个神经细胞，并将这个信息传递给大脑。如果我们再多进化一点，使我们眼睛的灵敏度再提高十倍的话，我们就无需再做这个讨论了——我们所有的人就都可以把非常微暗的单色光看成是一系列断断续续的强度相同的小闪亮。

你们也许会担心一个单个的光子怎么可能被探测到。有一种仪器可以做这件事，它叫做光电倍增管（photomultiplier）。我给你们简单描述一下它是怎么工作的：当一个光子打到底部的金属板A（见图1）时，它将这个板上的一个电子从一个原子里打出来。这个自由电子被很强地吸向B板（它上面带正电），并以足够大的力撞到B板上，打出三、四个电子。从B板上打出来的每一个电子又都被吸向C板（它也带正电），这些电子与C板的碰撞将敲打出更多的电子。这个过程重复十或十二遍，直到有上亿万个电子（这些电子足以形成一股相当大的电流）打到最后一块板L上。这个电流可以用一个普通的放大器加以放大，并送到扩音器，通过扩音器发出可以听到的“嗒”“嗒”声。每次某给定颜色的一个光子打到光电倍增管时，就可以听到一声声同样的“嗒”声。

如果你把所有的光电倍增管围成一圈，并让一个很暗弱的光在中间向各不同方向照射，光进入一个或者另一个光电倍增管，并发出强度十足的一声“嗒”响。声响要么十足，要么全无——就是说，如果在某一给定时刻，一个光电倍增管作响了，在同一时刻，其他所有光电倍增管都

不会响（除非是两个光子在同一时刻离开光源这种偶然情况）。没有一个光子会分成两个“半光子”而走到不同的地方。

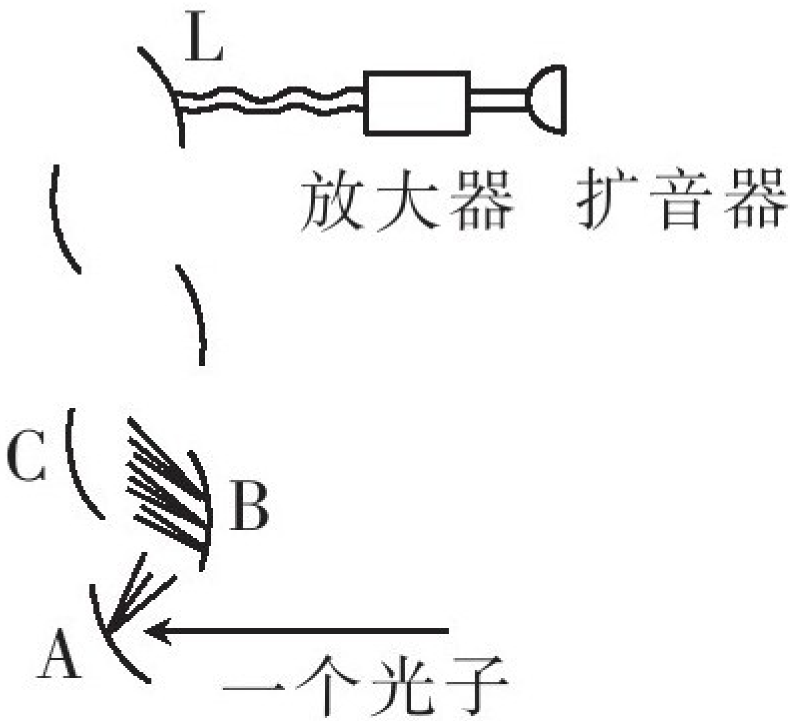


图1　光电倍增管可以探测一个单个的光子。当一个光子打到A板上时，一个电子就被敲出来，并被吸引到带正电的B板上，敲出更多的电子。这个过程持续下去，直到亿万电子打到最后一块板L上，并产生电流，这个电流被普通的放大器所放大。如果将一个扩音器同这个放大器联接，每当指定颜色的一个个光子打到A板上时，就会听到一声声同样的“嗒”声。

我想强调光是以粒子这种形式出现的。知道光的行为很像粒子这一点很重要，特别是对你们这些进过学校的人，你们在学校听到的恐怕是“光的行为很像波”这类说法。我要告诉你们，光的行为方式的确很像粒子。

你们也许会说，只有光电倍增管才能探测出光是粒子，但是，不然！所有的仪器，只要设计得对于探测弱光足够灵敏，最后总能够发现同一情况：光是由粒子组成的。

我想假设你们大家对日常生活中常见的光的性质都很熟悉——比如，光走直线；进入水中时弯曲；在从镜子之类东西的表面反射时，它射向表面的角度与离开表面的角度相等；光可以分解为色光；如果一个

小水坑的水面上有点油，你可以看到美丽的颜色；透镜可以聚光，等等。我想就你们所熟悉的这些现象来说明光的确实稀奇古怪的行为；我打算用量子电动力学的理论来解释这些熟悉的现象。刚才我讲了光电倍增管，目的是向你们说明你们可能还不大熟悉的一个本质现象——光是由粒子组成的，但是到现在，我希望你们对这点也熟悉了。

好，我想你们大家都熟悉光从一些表面（例如水表面）部分反射的现象。许多罗曼蒂克的油画，画面上有月光从湖面反射，（大概有不少次你们让湖水反射的月光弄得挺尴尬吧！）当你低头看水时，你可以看见湖面以下的东西（特别是在白天），但你也可以看到从湖面反射的东西。玻璃是另一个例子：如果你在白天点亮房间里的一盏灯，然后透过玻璃窗向外看，你可以看到窗外的东西以及房间里这盏灯的昏暗模糊的反射。所以说，光从玻璃表面是部分反射的。

在我继续往下讲之前，我想让你们知道我打算做的一个简化，以后我会把这个简化再纠正过来的：当我谈到玻璃对光的部分反射时，我打算装作以为光只是从玻璃的表面反射。事实上，一片玻璃是一个复杂得可怕的怪物——极大量的电子在那里摇来晃去。一个光子射到玻璃上时，它是同整块玻璃中各处的电子——而不是只同表面上的电子——相互作用。光子和电子一起跳着一种舞，而净结果与光子只射到表面的结果是一样的。所以让我暂时做这个简化。以后我再给你们讲，在玻璃内部实际上发生的是什么，这样你们就可以理解结果为什么是相同的。

现在我想描述一个实验，并告诉你们它的令人吃惊的结果。在这个实验中，一些颜色相同——比如说红色——的光子从光源落向一块玻璃（见图2）。一个光电倍增管置于这块玻璃上方的A处，用来捕捉由前表面反射的光子。为测量有多少光子通过前表面，把另一个光电倍增管安置在这块玻璃的里面。你们别管把这个光电倍增管放到这块玻璃里面有多难，只想想这个实验的结果是什么？

对于每100个以90°垂直入射玻璃的光子，平均有4个到达A，96个到达B。所以，所谓“部分反射”在这里的意思是，有4%的光子被玻璃的前表面反射回去，96%则穿过去了。现在我们已经陷入困境：光怎么能够部分反射呢？每个光子或终止于A，或终止于B——这每个光子是怎么做出应该是去A还是去B的决定的呢？（听众笑！）听起来这可能是个笑话，但我们不能只是笑笑而已：我们非要用理论做出解释不可！部分反射是个深邃的奥秘，它对于牛顿是个很困难的问题。

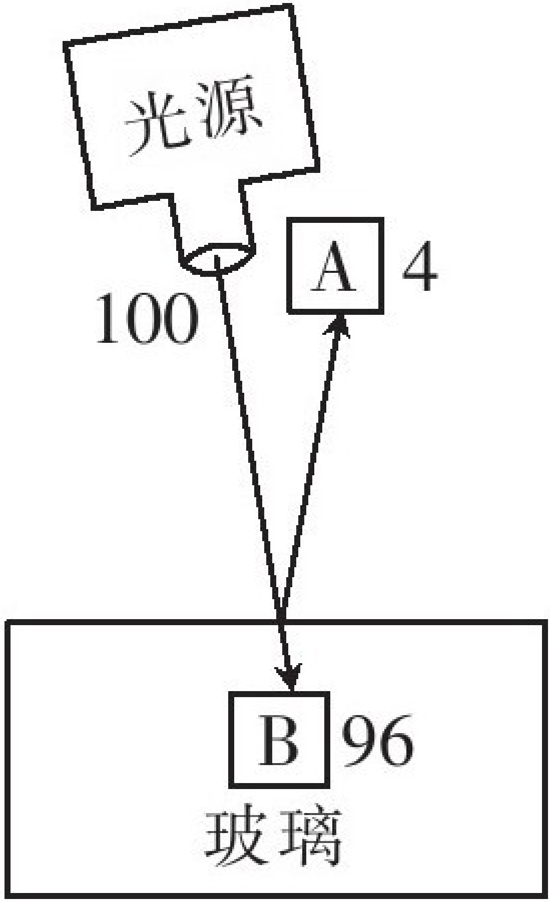


图2　这是关于测量光被玻璃的一个单个的反射面部分反射的实验。对于离开光源的每100个光子，有4个由前表面反射回去而终止于A处的光电倍增管，而其他96%则穿过前表面而终止于B处的光电倍增管。

你们或许能编造出几个可能的理论来说明玻璃为什么对光有部分反射。其中一个理论是：玻璃表面的96%是小孔，它们可以让光通过，而其余4%的表面则被由反射材料组成的小斑所覆盖（见图3）。牛顿认识到，这种解释是说不通的。①等一会儿，我们将会看到部分反射的一个奇怪的特点，如果那时你还坚持这个“孔斑理论”，或其他似是而非的理论，你就会给逼得发疯。

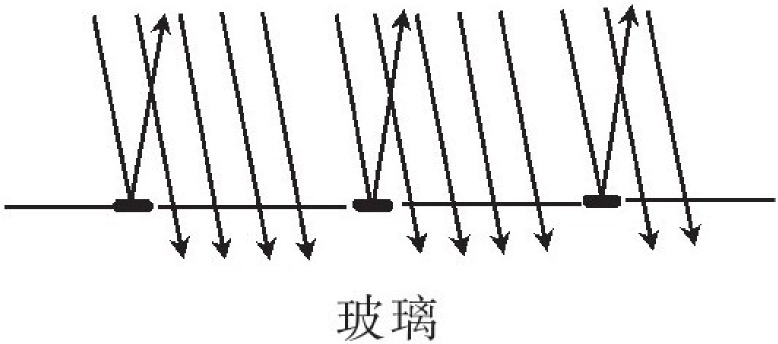


图3　一种用来解释单一表面部分反射的理论，它说反射表面由大量的孔和少数几块斑构成，孔让光通过，而斑则将光反射回去。

另一个可能的理论是：光子有某种内部机制——“轮子”、“齿轮”之类在光子内部以某种方式转动——这个内部机制使光子瞄准，如果正好瞄得准，光子就穿过玻璃；如果瞄得不准，光子就反射。我们可以用这样的方法检验这个理论：在光源和第一片玻璃之间再额外放置几层玻璃，这样，那些瞄得不准的光子就会被额外置入的这几层玻璃滤出去。通过这些过滤层而到达这片玻璃上的光子应该全部是瞄得很准的，因而应该无一被反射。这个理论的问题在于，它与事实不符：即使在透过很多层玻璃之后，到达给定表面上的光子仍然有4%为这个表面所反射。

我们也许会试着创造一个持之有故的理论，来解释光子如何自己“做出决定”，是穿过玻璃，还是反射回去，但要预言一个给定光子将走哪条路是不可能的。哲学家曾说过，如果在同样的情况下，不能永远产生同样的结果，要做预言是不可能的，科学也就垮台了。这里就是这样一种情况——全同光子总是沿着相同的方向落到同一片玻璃上——可是产生了不同的结果。我们不能预言，一个给定光子将到达A还是B。我们所能做的全部预言，就是在100个落在玻璃上的光子中平均将有4个被玻璃的前表面反射回去。这是不是意味着物理学——一门极精确的学科——已经退化到“只能计算事件的概率，而不能精确地预言究竟将要发生什么”的地步了呢？是的！这是一个退却！但事情本身就是这样的：自然界允许我们计算的只是概率，不过科学并没就此垮台。

单一表面的部分反射已经是一个艰深的奥秘和困难的问题了，两个以至更多个表面的部分反射就绝对更让人头脑发懵。我告诉你们为什么。让我们来做第二个实验，测量光为两表面的部分反射。我们用一片薄玻璃取代以前那一大块玻璃，玻璃片的两个表面绝对相互平行，然后将一个光电倍增管置于这片玻璃之下，位置与光源相适应。这一次光子可能经前表面、也可能经后表面反射到达A，其余的将终止于B（见图4）。我们可能期望，前表面反射光的4%，而后表面反射其余96%的4%，加在一起，大约8%。所以我们应该得到的是，在离开光源的每

100个光子中，约有8个到达A。

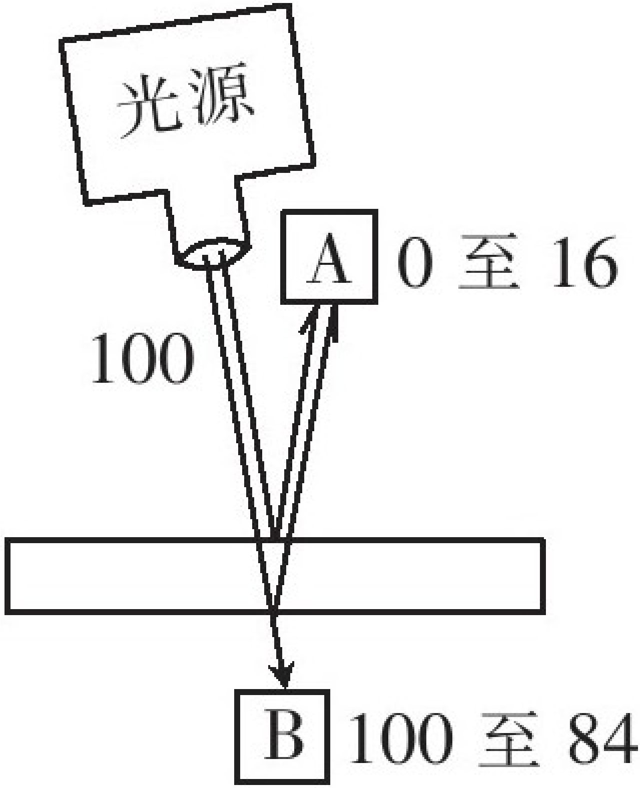


图4　这是测定光经过玻璃的两个表面部分反射的实验。光子可经由玻璃的前表面或后表面到达A处的光电倍增管，或者它们可穿过这两个表面打到B处的光电倍增管，并终止在那里。随着玻璃厚度的不同，每一百个光子中会有0至16个光子到达A处的光电倍增管。这个结果对任何合乎逻辑的理论（包括图3所示的理论）都是难题。看起来，部分反射可以被这个后增加的表面所抹杀或增大。

在实验条件得到精心控制的情况下，实际发生的事情是，每100个光子里有8个到达A的情况是很罕见的。用某些玻璃片，我们得到的读数总是15或16个光子——两倍于我们所期待的结果。用另一些玻璃片，我们又总是得到1或2个光子的读数。再用其他一些玻璃片，得到的部分反射是10%，有些玻璃则把部分反射索性抹得干干净净。什么理论能解释这么稀奇古怪的结果呢？我们检验了这些不同玻璃的质量和均匀度，发现反射结果的差异仅取决于玻璃的厚度。

为了检验光为玻璃的两个表面反射的量取决于玻璃厚度的思想，让我们来做一系列的实验：我们从尽可能薄到最薄程度的玻璃片开始，计

数从光源发出的100个光子中有多少到达A处的光电倍增管。然后我们再换一片稍厚一点的玻璃来做新的计数。将这个过程重复几十次，结果如何呢？

用尽可能最薄的玻璃，我们所得到的到达A处的光子数几乎总是0——有时是1。当我们换上稍厚一点的玻璃时，光的反射量也大了一些——向我们期望的8%接近。再这么换几次以后，到达A处的光子计数将超过8%这个标志。如果我们再继续换上越来越厚的玻璃，光为两表面反射的量将会达到最大值16%，然后再逐渐减小，通过8%，再回到0。——如果玻璃片的厚度适当，反射就会完全没有了。（用玻璃上的“孔和斑”能给出这样的实验结果吗？）

我们继续使玻璃片加厚，随着玻璃片越来越厚，部分反射再一次增加到16%，然后又返回到0——这个循环一遍一遍地不断重复（见图5）。牛顿发现了这种振荡并做了一个实验，只要这个振荡持续至少34，000个循环，他这个实验就能被正确地说明。今天，利用激光（它可以产生非常纯的单色光），这个振荡已经可持续100，000，000个以上的循环后仍然很强——这相当于玻璃的厚度超过50米。（我们日常看不见这个现象，那是因为光源在一般情况下不是单色的。）

这样一来，我们所预言的8%，原来作为平均值才是正确的（因为实际的值是从0到16%有规则地变化），在每个周期中，它则只精确地正确两次——就像一座停摆的钟：一天只正确两次。我们怎么才能解释部分反射依赖于玻璃厚度这个奇怪的现象呢？为什么在前表面下方某适当距离的地方放上第二个表面，我们就能把玻璃前表面所反射的4%给“抹掉”呢？而将第二个表面放在距离稍微不同的另一处，我们又能把部分反射放大到16%呢？这个后表面竟然对前表面反射光的能力施加某种影响或者作用，这怎么可能呢？如果我们放置第三个表面，又会怎样呢？

放上第三表面，或再增加任意多个表面，部分反射的量再次发生变化。我们发现我们自己是在用这个理论一个表面接一个表面地追下去，同时还记挂着是否终于到达了最后一个表面。一个光子为了“决定”它是否从前表面反射出去，它就非要这样一个表面一个表面地追下去不可吗？

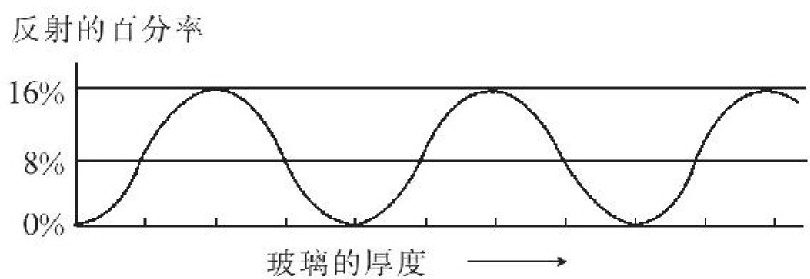


图5　仔细地测量一片玻璃的厚度与部分反射之间关系的实验结果演示

了所谓“干涉”的现象。当玻璃厚度增加时，部分反射一直在0与16%之间反覆循环，没有迹象表明这个循环会衰弱下去。

关于这个问题，牛顿曾做过一些天才的讨论，②但他最后还是承认，他还没能建立一个令人满意的理论。

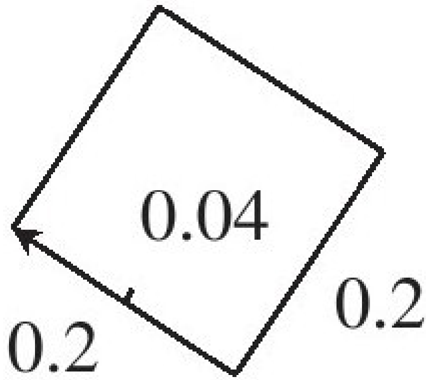
牛顿以后的许多年间，两表面的部分反射现象由波动理论解释得很好，③当实验做到以非常微弱的光打到光电倍增管上时，波动理论就垮台了：当光越来越微弱时，光电倍增管的作响声强度不减，只是次数越来越少，光的行为类似于粒子。

现今的情况是，我们还没有一个好的模型来解释两表面的部分反射；我们只是计算某特定的光电倍增管被一片玻璃反射回来的光子所撞击的概率。我选择这个计算作为我们第一个例子来讲述量子电动力学理论所提供的方法。我要告诉你们“我们怎样数豆子”——就是说为了得到正确答案，物理学家是怎样做的。我不打算解释光子实际上如何“决定”它们是反射回来，还是穿过玻璃，这个问题尚属未知。（恐怕这个问题本身就没有意义。）我将只给你们讲怎样计算光从厚度给定的玻璃片反射的正确概率，因为只有这一件事物理学家知道该怎样做。要得到用量子电动力学解释的所有其他问题的答案，其所用方法都与为得到这个问题的答案所使用的方法类似。

我希望你们能振作起精神，全神贯注地听下面这个问题——不是因为这个问题难于理解，而是因为它绝对地荒唐可笑：我们所做的全部事情，就是在一张纸上画小箭头——没有别的，就是这些！

好，那么我们现在问，一个箭头和一个特定事件发生的概率有什么关系呢？根据“我们怎样数豆”的规则，一个事件发生的可能性等于箭头长度的平方。例如，在我们的第一个例子里（即我们测量仅从前表面的部分反射），光子到达A处光电倍增管的概率是4%。与之相应的箭头的长度应为0.2，因为0.2的平方是0.04（见图6）。

图6　两表面部分反射的奇异特性迫使物理学家放弃对一个事件做绝对的预测，而只是计算它的可能性。量子电动力学给出了进行这种计算的方法——在纸上画小箭头。一个事件的概率就由以这个箭头为边的正方形的面积来表示。例如，一个代表概率为0.04（4%）的箭头的长度为0.2。



在我们的第二个实验中（即用一块稍厚的玻璃取代薄玻璃），到达A处的光子可能是从前表面反射回去的，也可能是从后表面反射回去的。对这种情况，我们怎样画箭头表示呢？为了表示从0至16%的概率（取决于玻璃的厚度，见图7），箭头的变动范围必须在0至0.4之间。

我们首先考虑，一个光子能够从光源到达A处光电倍增管的各种不同方式。因为我已经做了简化，即光从前表面或从后表面反射回来，那就是说光子可通过两个可能的方式到达A。对这种情况，我们要画两个箭头——对此事件可能发生的每种方式都画一个箭头，然后把这两个箭头合成一个“最终箭头”，它的平方就代表这个事件的可能性。如果一个事件可能以三种不同的方式发生，我们就画三个分立的箭头，然后将它们合成。

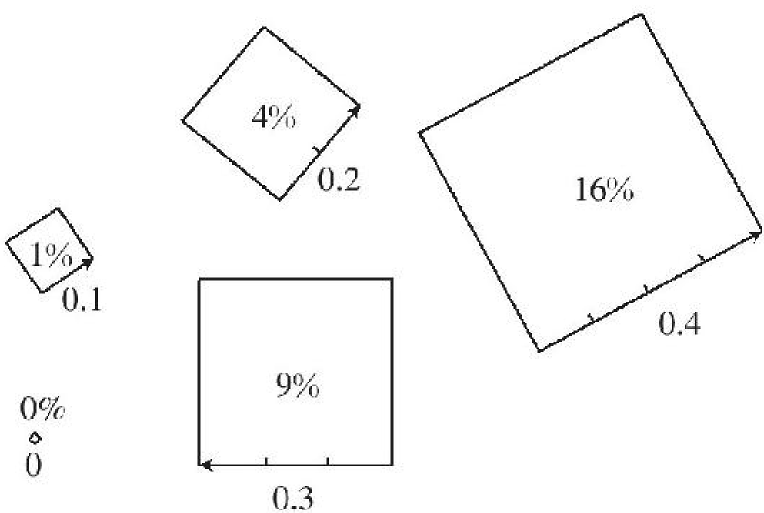


图7　代表概率从0%至16%的箭头，它们的长度是从0至0.4。

现在，我告诉你们，我们怎样合成箭头。比如说，我们想合成箭头x与箭头y（见图8）。我们所做的无非就是将x的头接上y的尾（两个箭头都不改变方向），然后自x的尾至y的头画上最终箭头，要做的，仅此而已。我们可以按这个方法合成任意多个箭头（专业术语叫做“矢量相加”【adding　arrows】）。每个箭头都会告诉你在跳舞时，要朝哪个方向，移动多远。而最终箭头将会告诉你，怎样只移动一步就可以到达同一个终点（见图9）。

现在来看一看，在决定我们加以合成的每一个箭头的长度和方向时，有什么特殊的规则。对这个特定的情况，我们将合成两个箭头——一个代表从玻璃前表面的反射，另一个代表从后表面的反射。



图8　一个箭头代表一事件发生的一种可能的方式，把所有这些箭头画出之后，再将它们以下列方式合成（即“加起来”）：将一个箭头的头部接到另一个箭头的尾部，每个箭头都不改变方向，然后从第一个箭头之尾至最后一个箭头之头画一个箭头，这就是合成的最终箭头。

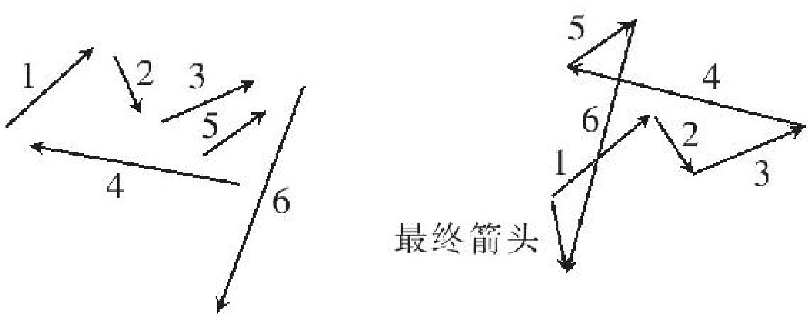


图9　用图8描述的方法，可以合成任意多个箭头。

我们先看长度。正如我们在第一个实验（我们将光电倍增管置于玻璃之中）中所看到的，前表面将到达的全部光子的4%反射回去。这意味着“前反射”箭头的长度应为0.2。玻璃的后表面也反射4%，这样“后反射”箭头的长度也应该是0.2。

为决定每一个箭头的方向，让我们想象用一个记秒表来记录光子的运动时间。这个假想的记秒表只有一个指针，它转动得飞快。当一个光子离开光源时，我们按动记秒表。只要这个光子在动，记秒表就转（对红光而言，光子前进1英寸，它转36，000圈）。这个光子到达光电倍增管时，我们让记秒表停住。这时指针指定一个方向。那就是我们要画的箭头的方向。

为了正确地计算答案，我们还需要一个规则：当考虑光子从玻璃的前表面反跳回来这个方式时，要把箭头反过来。换句话说，当我们画后表面反射的箭头时，它的指向与记秒表指针方向相同，而画前表面反射的箭头时，方向要和记秒表指针方向相反。

好，现在我们来画光从极薄的玻璃片上反射这种情况的箭头。要画前表面反射箭头，我们设想一个光子离开光源（记秒针开始转动），然后从前表面反跳回去，到达A（记秒表指针停）。我们画一个小箭头，其长度为0.2，方向与记秒表指针的方向相反（见图10）。

为了画后反射箭头，我们设想一个光子离开光源（记秒表开始转动），穿过前表面，而从后表面弹回，到达A（记秒表停）。这次记秒表针的指向几乎同原来一样，因为从后表面弹回的光子仅用了稍长一点点的时间就到达了A——它两次穿过极薄的玻璃。我们现在画一长度为0.2的箭头，方向与记秒表指针的方向相同（见图11）。

现在我们来合成这两个箭头。因为他们二者长度相同，指向却几乎相反，所以最终箭头的长度几乎为零，它的平方也更接近零。这样，光从一片无限薄玻璃反射的概率实际上就是零（见图12）。

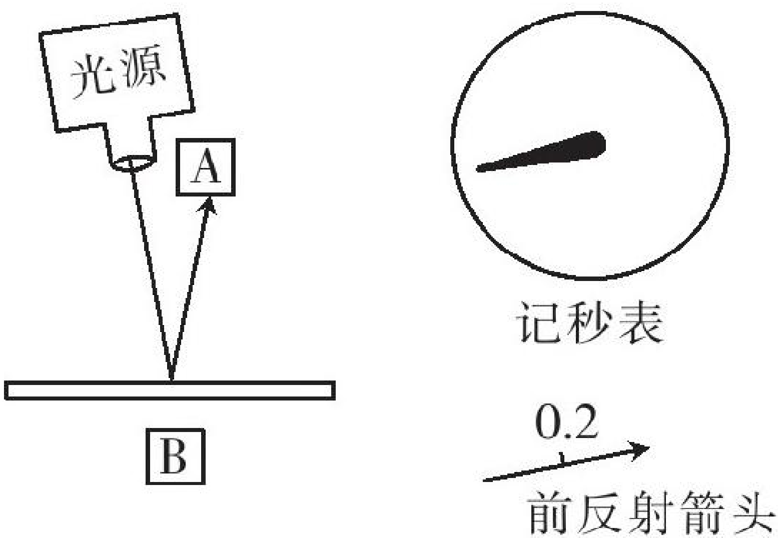


图10　在测定两表面反射的实验中，我们可以说，一单个光子可以两个

方式到达A——经前表面或经后表面。两种情况下，箭头的长度均为0.2，而方向则取决于对这个光子运动计时的记秒表的指针方向。“前表面”箭头的方向与记秒表停转时指针的方向相反。

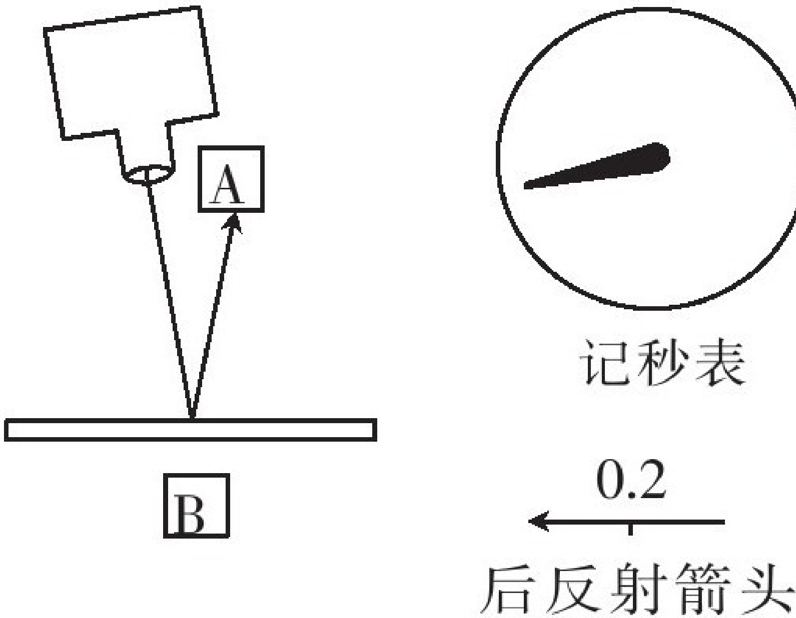


图11

图11　一个从一片极薄玻璃的后表面反弹回去的光子只用稍微长了一点点的时间即到达A。这样记秒表针的指向与对从前表面反弹回去的光子记时的记秒表针的指向只稍稍有点不同。“后反射”箭头的方向与记秒表针的指向相同。

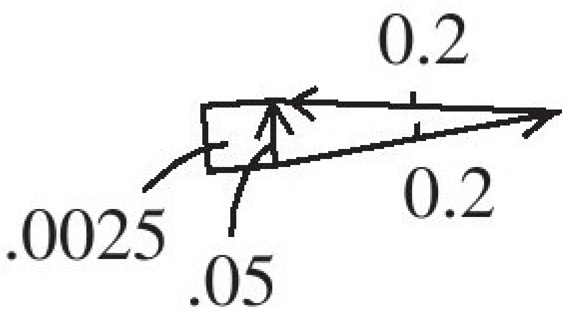


图12

图12　将前反射箭头与后反射箭头相加即可画出最终箭头，它的平方就代表了从一层极薄的玻璃反射的概率。结果是几乎为零。

如果我们用一片稍厚一点的玻璃取代那片最薄的玻璃，从后表面反弹回去的光子到达A的时间比上面第一个例子就要长一些。这样，指针在停转之前就要转动得稍多一点，后反射箭头相对于前反射箭头，角度也稍稍大一些。最终箭头就稍稍长一点，它的平方相应地也就大一些（见图13）。

再举另外一个例子，让我们看一看玻璃的厚度足以使对从后表面反弹回来的光子计时的记秒表的指针比从前表面反弹回来的正好多转半圈的情况。这次，后反射箭头与前反射箭头的指向完全相同。将这两个箭头合成，我们得到长度为0.4的最终箭头，它的平方是0.16，代表着可能性为16%（见图14）。

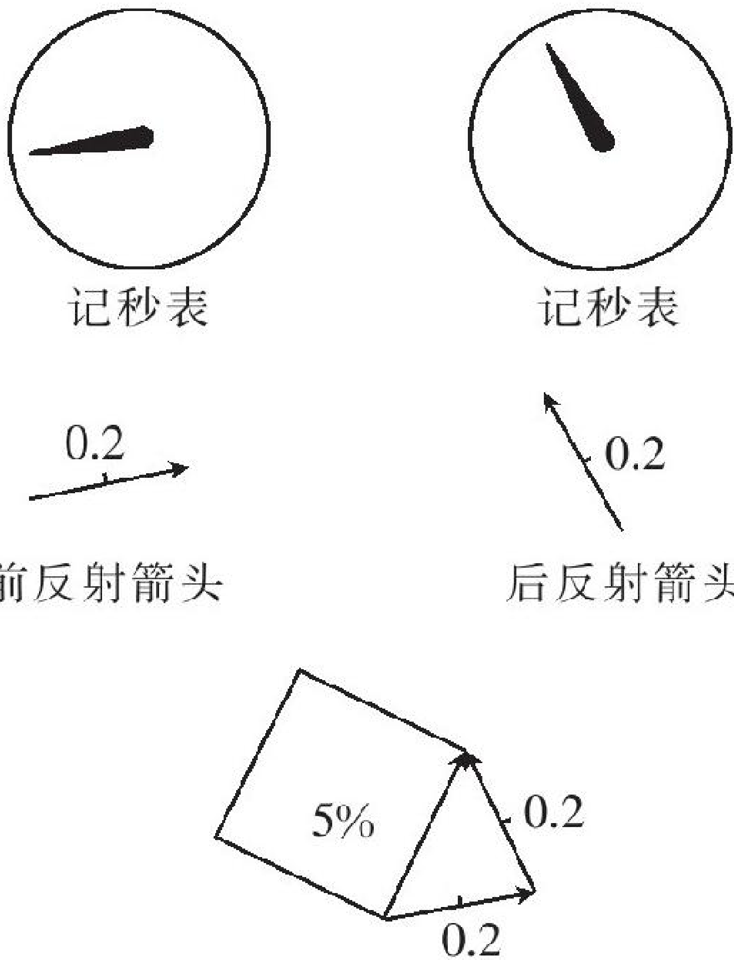


图13　对于稍厚一点的玻璃片，由于前后反射箭头之间相应的角度稍大

一点，最终箭头也就稍长一点。这是因为同前一个例子相比，光子从后表面反弹回去到达A需要稍长一点的时间。

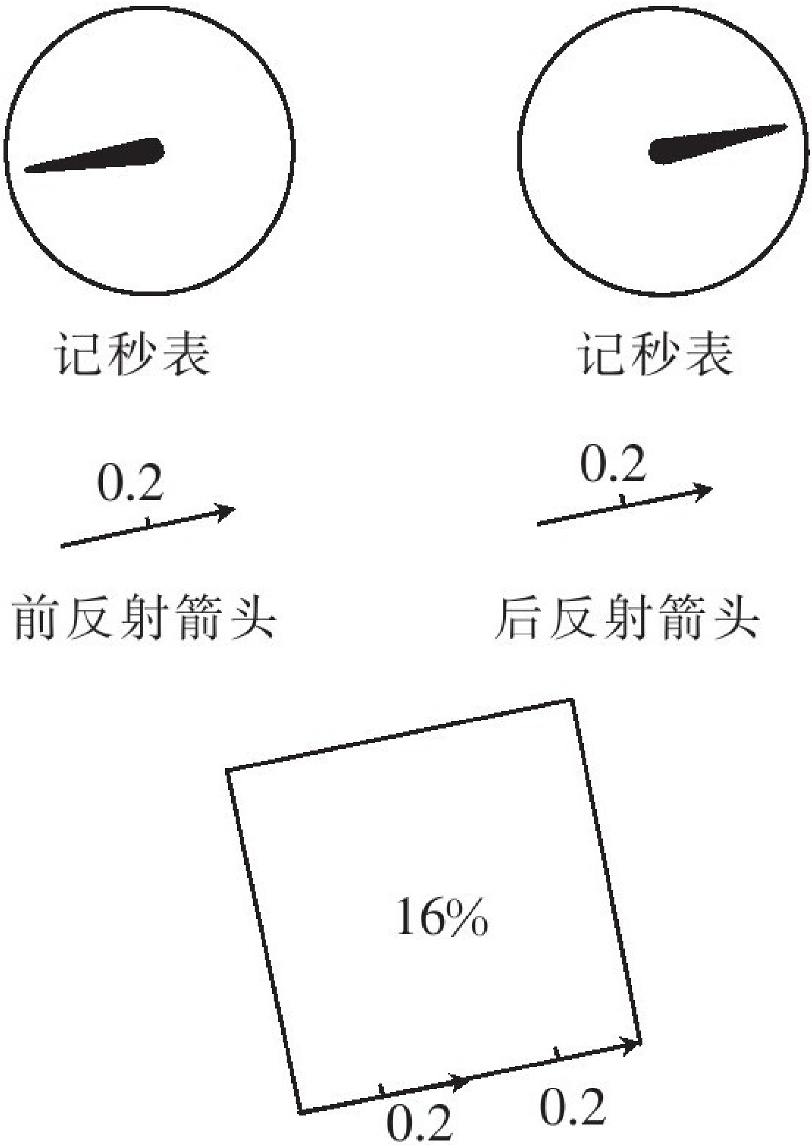


图14　当这片玻璃厚得足以使对后反射光子记时的记秒表的表针多转半圈，那么前后反射的箭头最终指向同一方向，结果最终箭头的长度是0.4，这表示概率为16%。

如果增加的玻璃厚度恰恰使得测定后表面路径的记秒表指针多转整

整一圈，我们的两个箭头再次指向相反的方向，则最终箭头将为零（见图15）。每当玻璃的厚度足以使测后表面反射时间的记秒表针又转一整圈时，这种情况就再一次发生。

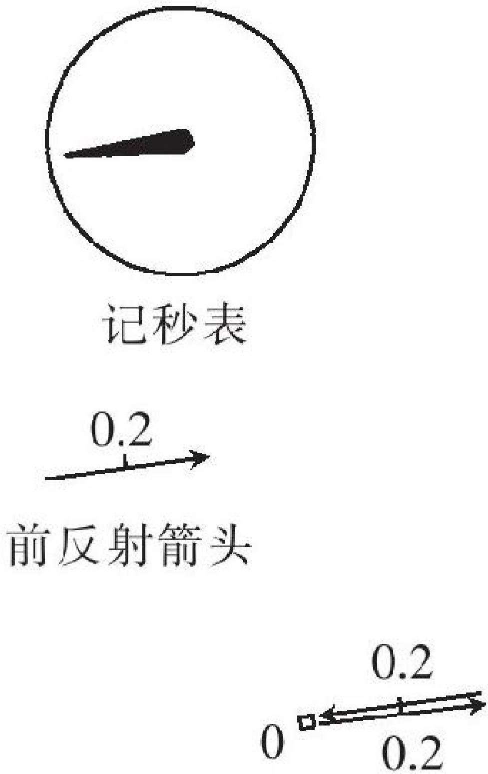


图15　如果这片玻璃的厚度刚好使对后反射光子计时的记秒表的指针整整多转一圈或数圈，那么最终箭头还是零，从而完全没有反射。

如果玻璃的厚度使测量后反射时间的记秒表的指针正好多转1/4圈或3/4圈，那么两个箭头将成直角。这种情况下的最终箭头将是直角三角形的斜边。而根据毕达哥拉斯定理，斜边的平方等于其他两边的平方和。这就是前面说过的那个“一天两次”正确的值——4%＋4%得8%（见图16）。

注意，当我们逐渐增加玻璃的厚度时，前反射箭头永远指向同一方向，而后反射箭头则逐渐改变方向。两个箭头相对方向的变化使得最终箭头的长度从0到0.4循环；这样，最终箭头的平方则在0到16%之间循环，这就是我们在实验中看到的现象（见图17）。

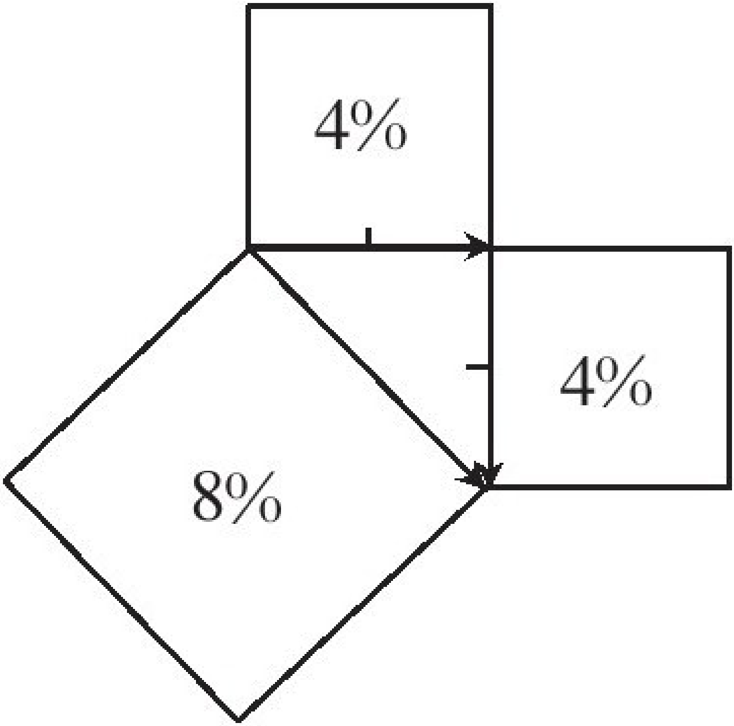


图16　在前后反射箭头相互成直角时，最终箭头是直角三角形的斜边。这样，这个斜边的平方就是另外两边的平方和——8%。

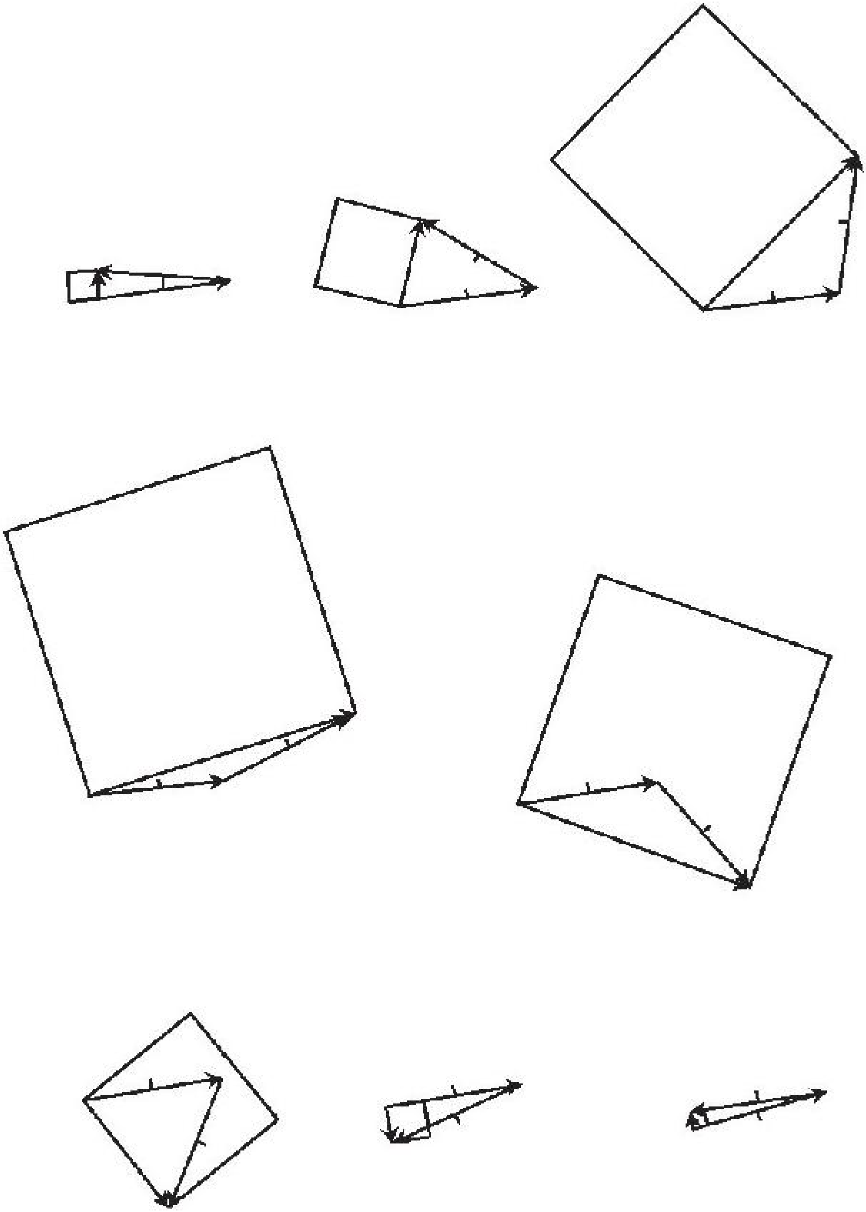


图17 当薄玻璃为稍厚的玻璃取代时，对从后表面反射的光子计时的记秒表指针转动得稍多一点，前后反射箭头之间相应的角度就改变了。这导致最终箭头长度的改变，它的平方也就从0变到16%，再回到0，这样一再的重复。

我刚才已经告诉你们，部分反射的这种奇妙特性，怎样通过在纸片上画一些该死的小箭头就能精确地计算出来。这些箭头的专业术语是“概率振幅”（probability amplitudes），如果我说我们“正在计算一个事件的概率振幅”，我觉得比较光彩些。不过，我倒倾向于一种更诚实的说法，即我们正在努力求出一个箭头，它的平方代表某事件发生的概率。

在结束第一讲之前，我想再谈谈你们在肥皂泡上见到的颜色是怎么回事。或者，更好的例子是，如果你的汽车陷在泥淖里漏了油，在观看这肮脏泥淖上棕色的漏油时，你会看到泥淖表面上的美丽颜色。浮在泥淖上的薄油膜有点像一片很薄的玻璃片。它对一种色光的反射可从零到最大值，具体数值取决于油膜的厚度。如果用纯红光照射油膜，我们就会看到红光斑被一些黑色窄条（那里没有反射）分割开，这是因为油膜的厚度并不绝对均匀。如果用蓝光照射油膜，我们将看到蓝光斑被黑色窄条分割开。如果用红和蓝两色光照射油膜，我们会看到有些区域（厚度恰好适合反射红光）仅强烈反射红光，另一些区域（其厚度适合反射蓝光）仅反射蓝光，也还有一些区域（其厚度适合反射红蓝两色光），强烈反射红蓝两色光——在我们的眼睛看来，这是紫光；而在厚度适当的另一些区域，则所有的反射都相互抵销掉，这里呈现黑色。

为了把这个问题理解得更透彻些，我们需要知道，两表面部分反射从0到16%的这种循环，蓝光比红光重复得快些。这样，在厚度适当的某些区域，一种色光，或另一种色光，或两种色光一起被强烈反射，而在厚度为另外一些值的区域，两种色光的反射都恰被抵销掉（见图18）。反射的这个循环之所以以不同的速率重复，是因为记秒表指针在对蓝光子计时的时候，比对红光子计时的时候转得快些。事实上，这是红光子和蓝光子（或者同其他颜色的光子，包括无线电波、X射线等等）的唯一区别——记秒表指针转速不同。

如果我们用红蓝两色光照射一层油膜，会出现红、蓝和紫色图案，其中杂以黑色间隔。当阳光（包含红、黄、绿和蓝光）照射到泥淖上的油膜时，强烈反射这些色光的区域搭接在一起，构成形形色色的综合，我们的眼睛看到的就是各种不同的颜色。当油膜在水面上扩展时，它各区域的厚度随之发生变化，色彩的图案也就不断变化。（相反地，如果你想在晚间观看路灯【钠灯】照射下的同一泥淖，你会发现只有间以黑色条纹的黄色色带——因为这些特殊的路灯仅发射一种色光。）

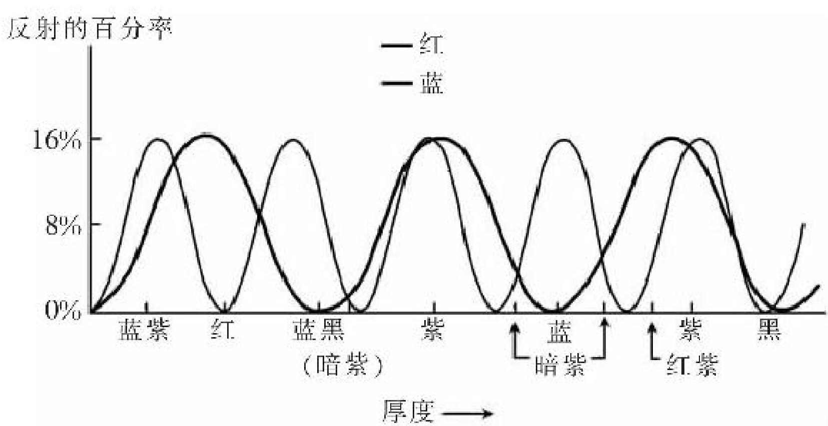


图18　随着薄层厚度的增加，两表面对单色光产生的部分反射，其反射

概率以0至16%的循环而起伏。由于想象中的记秒表指针的转速随光的颜色的不同而不同，所以这个循环自我重复的速率不同。这样，当比如像纯红和纯蓝这样的两色光射到这个薄层上时，某个厚度将仅反射红光，或仅反射蓝光，或以不同的比例反射红蓝两色光（因而产生出各种不同的紫光），或什么光都不反射（呈黑色）。如果薄层的厚度各处不同，比如在泥淖上散开的一滴油，上述这些现象会综合在一起发生。在阳光（包含所有色光）下，各类综合都会发生，从而产生丰富的色彩。

由两表面对白光部分反射而产生颜色的现象叫做彩虹现象（iridescence），这在很多场合都可以见到。也许以前你们琢磨过蜂鸟和孔雀的鲜艳色彩是怎样产生的。现在你知道了。它们的这些鲜艳颜色是如何进化来的也是个有趣的问题。在观赏孔雀时，我们确应称赞一代一代貌不惊人的雌孔雀选择她们雄性伴侣的能力。（后来，人类也参与了这个活动，使孔雀选择过程的效率更高。）

下一讲，我要做给你们看看，对于其他一些你们所熟悉的现象，用小箭头合成这种荒唐方法怎样能计算出正确答案。这些现象包括光沿直线传播、光从镜面反射的角度与它射入镜面的角度相同（即“入射角等于反射角”）、透镜聚光等等。这个新的提纲将描述你们所知道的关于光的一切。

注释

①牛顿怎么会知道这种解释是说不通的呢？牛顿是个非常伟大的人：他写道，“因为我会磨玻璃。”你也许会奇怪他说的糊涂话，什么叫因为你会磨玻璃，玻璃表面就不可能是“孔”和“斑”呢？原来，牛顿是亲自磨制自己用的透镜和镜子的，而且他知道，在磨的时候他究竟是在干什么。他是在用越来越细的粉末在玻璃表面上制造擦痕。随着擦痕越来越细腻，玻璃的表面就从原来的暗灰（由于光为大擦痕所散射）变得越来越透明光洁（因为这些极微小的擦痕让光通过）。这样，他就看出，要接受光能为细小的擦痕或“孔和斑”的不规则性所影响这类的解释是不可能的。实际上，他发现事情刚好相反，最细小的擦痕，以及与它同样细小的斑痕都不影响光。所以孔斑理论是不可取的。

②牛顿让自己确信光是“粒子”，这对我们来说是很幸运的，因为这使我们有机会了解到，一个多么富于创造性的天才头脑，在面对两表面或多表面部分反射的这个现象时，不得不绞尽脑汁来做出解释。（那些相信光是波动的人，就从来不会为这个问题伤脑筋。）牛顿的讨论是这样的：虽然看起来，光是从第一表面反射的，但实际上它可能不是从这个表面反射的。如果光真是从第一表面反射掉了的话，那么当玻璃为一定厚度而完全没有反射时，那已经被第一个表面反射掉的光，怎么会又给捕捉回来了呢？这样看来，光一定是被第二个表面反射的。但是，要说明为什么玻璃厚度决定部分反射量这个事实，牛顿提出这样一个思想：打到第一个表面上的光发出一种波或场，它随着光一起运动并预先安排光是否从第二个表面反射。他称这个过程为“易反射或易透射的阵发

痉挛”，它周期性地出现，并取决于玻璃的厚度。

这个思想有两个困难：第一个是附加表面的作用——每一新表面都影响反射——这我们在讲课时，已经讲过了。另一个问题是光肯定要为湖水所反射，而湖却没有第二个表面，所以光必定是由前表面反射的。对于这种单表面的情况，牛顿说光事先已经有了反射的安排。一个理论要求光知道它将要打上的是怎样的表面，以及是否是唯一的表面，我们能接受这样的理论吗？

牛顿显然知道他的“易反射或易透射的阵发痉挛”理论不能令人满意，但他没有强调这个理论带来的这些困难。在牛顿那个时候，人们对理论带来的困难只做简单的处理，掩饰过去——这同我们今天在科学上对待难题的方式不同。今天，我们要把我们的理论和实验观测不相符合的地方指出来。我可不是要说任何反对牛顿的话；我只是想夸一夸我们今天在科学上相互交流时是怎么做的。

③波动理论解释这个现象利用的是波可以相长或相消的事实，根据这个模型所做的计算，与牛顿的实验以及此后几百年的实验相符合。但是仪器已经进步到精确得足以探测出单个光子的程度，这时，波动理论的预言是光电倍增管的作响声将越来越弱——但事实上，每一次作响的强度始终如一，只是作响的次数越来越少。没有一个说得通的模式能够解释这个事实——所以曾经有过那么一个时期，那时人们非得一时一时地放聪明点不可：为了说光是波动还是粒子，你必须要知道你在分析的是什么样的实验。人们称这种混乱状况为光的“波-粒二象性”，或者像一个人开玩笑说的那样：光在星期一、三、五是波动，二、四、六是粒子，而在星期日，我们就要思考它是什么。这个讲座的目的，正是要告诉你们，这个谜最终是怎样解开的。

2.光子：光的粒子

这是关于量子电动力学的系列讲座的第二讲。显然诸位上次都不在座（因为上次我告诉大家，他们别打算听懂任何东西），所以我先把第一讲的内容简要地总结一下。

第一讲我们讲的是光。光的第一个重要特点是，它看起来是粒子：如果我们用非常微弱的单色光（即一种颜色的光）打到探测器上，那么当光越来越弱时，探测器作响的次数就越来越少，但每次作响的声响的大小不变。

上一讲讨论的光的另一个重要特性是单色光的部分反射。打到玻璃单表面上的光子有4%被反射回来。这件事就已经是个艰深的奥秘了，因为不可能预测哪个光子反回来，哪个光子穿过去。加上第二个表面后，结果更是奇怪，两表面的部分反射不是所期望的8%，而是可以高达16%，或完全没有——究竟如何则取决于玻璃的厚度。

两表面部分反射的这个奇怪现象，在强光的情况下，可由波动理论来解释，但波动理论所不能解释的是，在光越来越微弱时，探测器发出的“嗒”“嗒”声总是同样的强。量子电动力学“解决”了这个“波-粒二象性”的问题，它的说法是，光是由粒子组成的（正如牛顿原来所想的那样），但科学的这个巨大进步的代价是物理学被迫后撤，撤到它所能计算的只是一个光子打中探测器的概率这种地步，而给不出一个很好的模型来说明：实际发生的到底是什么。

在第一讲中，我介绍了物理学家如何计算一个特定事件发生的概率。他们根据一些规则在纸片上画出一些箭头，这些规则是：

——基本原则：一个事件发生的概率等于所谓“概率振幅”之箭头的长度的平方。例如一个长度为0.4的箭头代表着0.16（或写作16%）的概率。

——一个事件可能以几种不同方式发生时，画箭头的一般规则是：对每种方式画一个箭头，然后合成这些箭头（把它们加起来），即用一个箭头的尾钩住前一个箭头的头。从第一个箭头之尾画向最后一个箭头之头，就画出了“最终箭头”。最终箭头的平方即给出整个事件的概率。

关于玻璃部分反射的情况，还有一些特殊的画箭头的规则（可参阅第1讲有关部分）。

上述内容就是对第一讲的一个复习。

刚才讲的这个世界模式同你们过去所见过的任何模式都完全不同

（而且恐怕你们希望永远不要再见到这样的模式了），现在我要做的就是给你们讲，用这个模式怎么能够解释你们所知道的关于光的全部简单性质：光从镜面反射时，入射角与反射角相等；光从空气进入水中时会发生弯曲；光直线行进；光能通过透镜聚焦等等。这个理论还能解释光的许多你们恐怕还不大熟悉的性质。我实在是愿意把你们在学校那么多年所学到的关于光的全部性质统统推导出来。实际上我在准备这个讲座时，感到最困难的是我必须克制自己的这个愿望，比如推导出光穿过边界进入阴影时的行为（称为“衍射”【diffraction】）等等。由于你们当中绝大多数人恐怕并未仔细地观察过这类现象，我只好忍痛割爱，不讨论它们了。但是，我可以向你们保证（不然的话，你们对我下面要举的例子会产生误解），所有被仔细观察了的光现象，量子电动力学都能够解释，尽管我打算讲的只是那些最简单、最普通的现象。

我们的讨论从一面镜子开始——确定光从镜面如何反射的问题（见图19）。我们在S处放置一个以很低强度发射单色光（让我们假设还是红光）的光源。这个光源一次只发射一个光子。在P点，我们放置一个光电倍增管来探测光子，为了对称，让它的高度与光源的高度相同。如果所有的东西都对称，画箭头将容易些。我们想计算的是一个光子被光源发射出来后使探测器作响的机会是多大。由于光子也可能走直线到达探测器，我们在Q处放置一个屏板防止这一点。

现在我们会期望所有到达探测器的光都是从镜的中央反射出来的，因为只有在这里，入射角才等于反射角。而且看来很明显，镜面上靠近两端的部分同反射没什么关系，就像它们同奶酪价格没什么关系一样，对吗？

你尽可以这样认为，就是说你可以认为镜面靠两端的部分同从光源出来的光子经反射到达探测器这件事没有任何关系。我们还是来看看量子电动力学是怎么说的。我们再重复一遍规则：一个特定事件发生的概率是最终箭头的平方。（将一个事件发生的每一种可能方式画一个箭头，然后将所有这些箭头合成，即“相加”，就可以得到最终箭头。）在以前我们讲过的那个两表面部分反射的实验里，光子从光源到达探测器可以有两种方式。而在这个实验里，一个光子可有千万条路可走：它可能向下到镜子左端的A或B（打个比方），然后反弹上来到达探测器（见图20）；它也可能从你认为理所当然的G处反弹回来；或者它可能下到镜子右端的K或M处，而后弹上来到达探测器。你也许会想我这么说简直是在发疯，因为我所说的光子从镜子反射的大部分可能路径，入射角与反射角并不相等。但是，我并没发疯，因为光实际走的路就是如此！——这怎么可能呢？

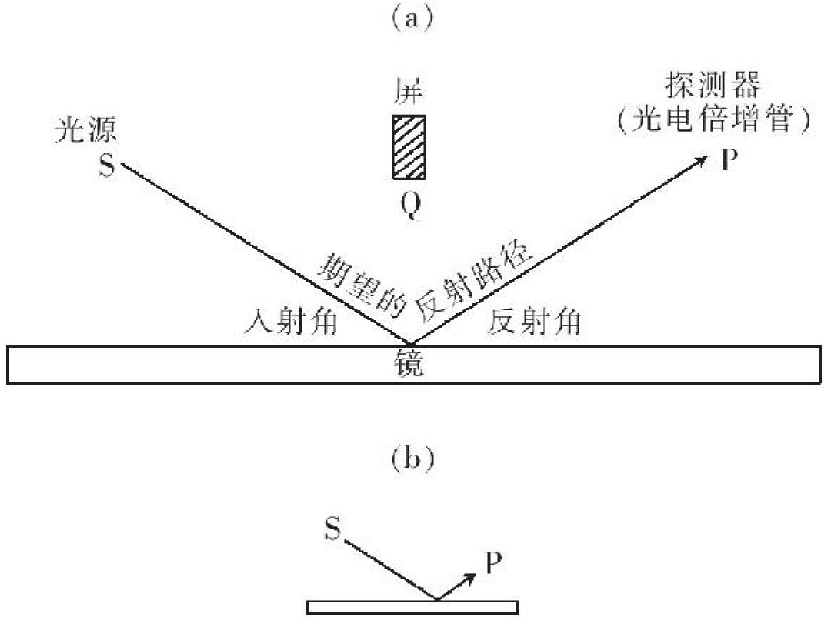


图19　经典世界观认为镜子反射光是从镜面上能使光的入射角与反射角相等的地方反射的，即使光源与探测器位于不同的水平高度时也是这样。见图（b）。

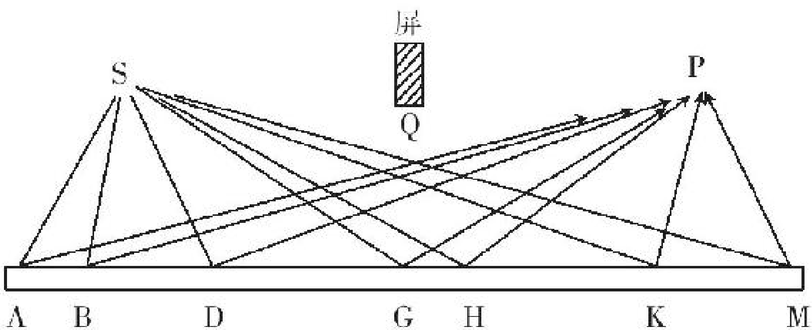


图20　量子世界观认为，光从镜面上任何部分（自A至M）反射的振幅都相等。

为了使这个问题比较容易理解，我们假设这个镜子只是从左至右的这么一个长条——同样，我们最好也暂时忘记这镜子是从纸面上凸起的（见图21）。虽然实际上光可以从这个小长条镜子上面的成千上万处反射，但我们暂把这条小镜子分成一定数量的小正方格，而且对每个小正方格仅考虑一条反射路径。当我们把正方格画分得更小，从而考虑更多的反射路径时，我们的计算就更精确一些（但也更困难一些）。（此为电子书）

现在我们把在这种情况下，光能走的每一条路径画一个小箭头。每个小箭头都有一定的长度和方向。我们先来考虑长度。你也许会认为通过镜子中心的G点的箭头最长，而且永远长于其他箭头（因为看来光子要到达探测器，非走这条路不可，所以光子走此路的概率非常高），而代表途经镜子两端的箭头一定相当短。不！不是这样！我们不应该提出这类任意武断的规则。正确的规则——即实际发生的情况——要简单得多：对到达探测器的每一个光子来说，它走的任何一个可能路径的机会都几乎相同。这样，所有小箭头的长度都几乎一样。（实际上，由于角度和距离不同，诸小箭头在长度上略有差别，不过小到我准备忽略不计。）这样，可以说，我们所画的每一个小箭头都可有任意的标准长度——我打算把这个长度定得很短，因为要代表光可能走的众多路径会有非常多的箭头（见图22）。

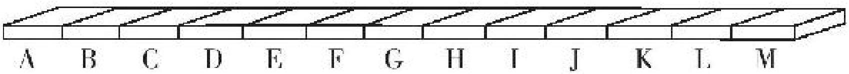


图21　为了比较容易地计算出光走到何处，我们暂时只考虑一长条镜子，把它分割为许多小方块，一个方块对应着一条光路。这种简化绝对无损于对情况的精确分析。

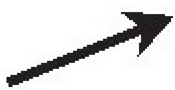


图22　在我们的图中，光可能走的每条路径将由一个任意标准长度的箭头代表，如图所示。

虽然我们可以很安全地假设，所有箭头的长度都几乎相同，但由于各光子的计时不同，它们的方向则明显不同——第一讲中我们曾说过，一个特定箭头的方向是由测定光子沿着某特定路径运动所需时间的记秒表指针的最终位置来决定的。如果一个光子途经镜子左侧的A点，然后上来到达探测器，它所经历的时间显然长于经镜中央G点而反射到探测器上的光子所用的时间（见图23）；或者，你可以想象一下，你匆匆忙忙想赶快从镜子上方的“源”点经过镜子到达探测器。你会知道，经过A点到达探测器肯定不是好办法，经过镜中央的某点一定会快得多。

为了帮助我们计算每个箭头的方向，我准备在那个镜子反射草图的正下方，再画一个图（见图24）。在镜子上光可能进行反射的每个地点的正下方，竖直地表示光走这条路所需的时间。所需时间越长，图上的点也就越高。从左端开始，光子途经A反射的这条路所需的时间相当长，所以我们把相应的点在图上标得很高。随着逐步移向镜子中央，光子沿我们注视的那一条条特定路径所需的时间越来越短，相应的点将依次标得越来越低。在通过镜子中央后，光子走过那些路径所需的时间会

越来越长，于是相应的点将标得越来越高。为了看着方便，我们把这些点联起来，它们组成一条对称的曲线，起点很高，然后向下，再回升到起始的高度。

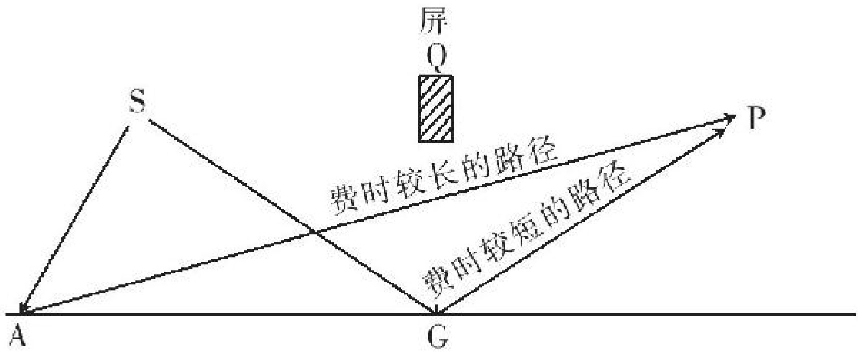


图23　所有这些箭头长度虽然差不多一样，但方向却各不相同，因为光子走不同的路径所需时间不同，走经A至P的路显然比经G至P的路需要的时间长。

那么，这些小箭头的方向意味着什么呢？一个特定箭头的方向对应着光子从光源到探测器沿着该特定路线所需要的时间。我们画几个箭头，先从左方开始。路径A用的时间最长，它的箭头指向某个方向（图24）。路径B用的时间与路径A不同，所以它的箭头方向也不同。在镜子的中部，箭头F、G和H指向几乎相同的方向，因为它们用的时间几乎相同。在通过镜子中央之后，我们看到镜子右侧的每条路径都对应着左侧的一条路径，二者所用的时间完全相同（这是我们把光源和探测器放在同一高度，并使路径G正好位于中央的结果）。这样，例如说路径J，它的箭头与路径D的箭头就有相同的方向。

好了，让我们把这些小箭头加起来（见图24）。从箭头A开始，我们把这些箭头一个一个头尾相接地钩起来。现在如果以每个小箭头为一步来散步的话，我们会发现，在开始时，散了半天步，我们也没从起点走出多远，因为每一步与它的下一步方向大不相同。但是过一会儿以后，箭头开始取大致相同的方向。这样，我们的散步就前进了一些。最后，在快散完步时，每一步与下一步之间，方向又开始明显不同——脚步又有点踉跄起来。

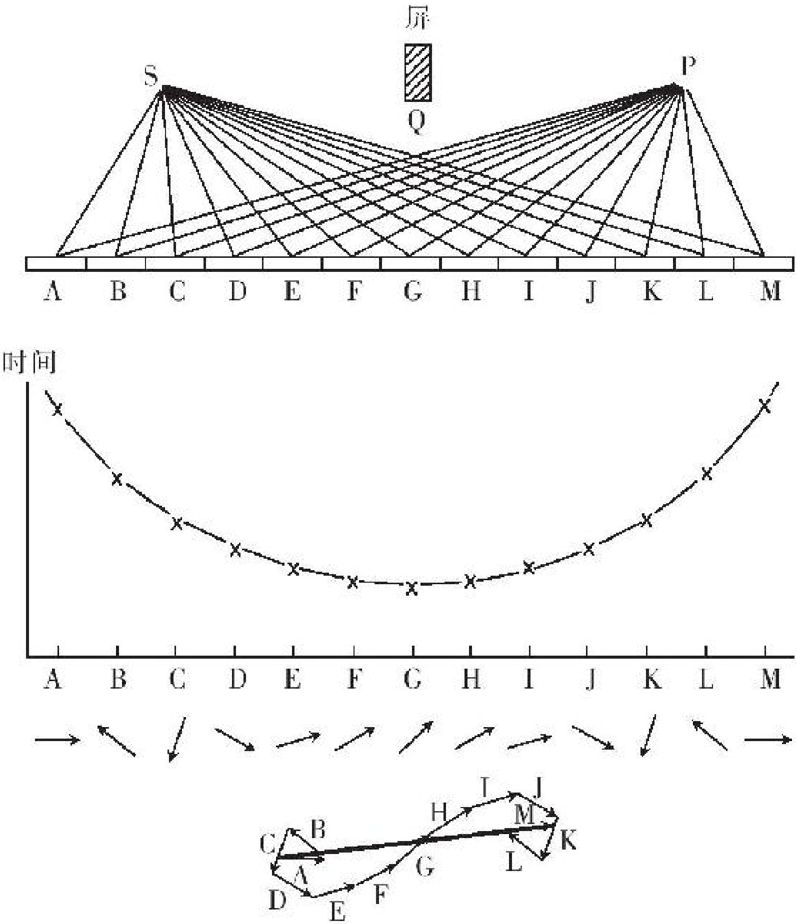


图24　光可能走的所有路径（在这个简化的情况下）见此图的上部，图上各点的正下方标出一个光子从光源途经镜上该点到达光电倍增管所需的时间。它的下面画的是每一个箭头的方向，最下面是所有箭头相加的结果。显然对最终箭头的长度做出主要贡献的是从E到I的箭头，由于这些路径的计时结果几乎相同，它们的方向也就几乎相同。这里也恰好就是所需时间最短的地方。所以，光走需时最短之路是大体不错的。

我们现在要做的事就是画最终箭头。只要把第一个小箭头之尾联上最后一个小箭头的头就行了。现在看看我们在散步时到底走了多远（图24）。看哪——我们得到一个相当可观的箭头！量子电动力学的理论预言，这个光确确实实从镜子反射出去。

好，现在来研究一下，是什么决定了这最终箭头到底有多长？我们注意到几件事情。第一，镜子的两端并不重要：在两端，这些小箭头转来转去，走不出多远。如果把镜子两端给砍掉——你可能早已直觉地感到我摆弄这两部分是在浪费时间——对最终箭头的长度不会有什么影响。

那么，镜子的哪部分对最终箭头的长度至关重要呢？那就是其代表箭头取向大致相同的部分，因为走这些路径所需的时间几乎相同。如果看一下图24对每条路径所标出的时间，你就会发现，曲线底部路径的时间（那里的时间最短）大致是一样的。

总之，所需时间最短之处也就是附近路径所需时间大致相同之处；也就是小箭头指向基本相同，因而对最终箭头的长度做出实质性贡献之处；是决定光子从镜面反射概率之处。这也就是为什么在做近似处理时，我们可以心安理得地接受一个粗糙的世界图象，即光仅走最短时路径（很容易证明，在所需时间最短之处，入射角等于反射角，但这里我没时间给你们证明了）。

这样，量子电动力学的理论给出了正确的答案——对于反射，镜子中部是重要部分——不过为得到这个正确结果，我们付出了很大代价，这就是相信光从镜子所有各处反射，并把这些小箭头统统加起来，而这么做的唯一目的是把它们相互抵销掉。也许在你们看来，所有这一切都是在浪费时间，不过是数学家的某种傻乎乎的游戏而已。毕竟，研究一些仅仅是为了将其抵销掉的东西，不大像是真正的“物理学”。

现在我们再做另一个实验，以考察整个镜子确实都在反射的思想。首先我们把镜子的大部分截掉，只留下左面的大约1/4。我们留下的这部分镜子不算小，只是位置不大适当。在以前讲的实验中，镜子左面部分箭头的指向相互之间差别很大，因为相邻路径之间，所需时间差别很大（图24）。在这个实验中，我准备对这部分做比较详细的计算。我的作法是：在镜子左面的部分精心划出间隔，使邻近路径之间所需时间差不多（见图25）。从这个更细致的图可以看出，一些箭头多少都指向右方，另一些箭头则多少都指向左方。如果我们把所有箭头统统加在一起，那就是有一把指向四面八方的箭头——它们的指向实际上是绕着圆转了一圈，相加结果等于零。

但是，假设我们仔细地刮去这面镜子中那些箭头偏向一方的（比如偏左方的）区域，这样，只有箭头指向偏右的区域留下来了（见图26）。如果把这些指向大致偏右的箭头加起来，我们就得到一连串的洼和一个指向偏右的很大的最终箭头——根据量子电动力学理论，这意味着现在该有一个强反射！果然，我们就得到了强反射——这个理论确实是正确的！这样的镜子叫做衍射光栅（diffrac-tion grating），它工作起来真像一面魔镜。

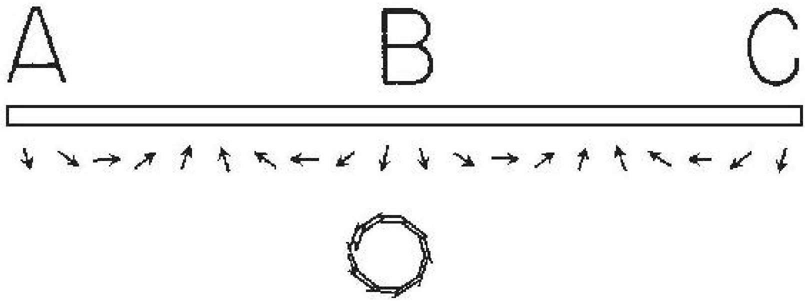


图25　为了检验镜子两端确有反射发生（只是它们恰好都给抵销掉了）这个思想，我们用一面大镜子做个实验，把这面大镜子放在对于从S到P的反射并不合适的地方。将这面镜子划分为相当小的小区域。这样沿一条路径所需的时间与相邻路径比起来相差无几。可是如果将所有这些箭头统统加起来，它们就一筹莫展了：这些箭头围成个圈，加起来几乎为零。

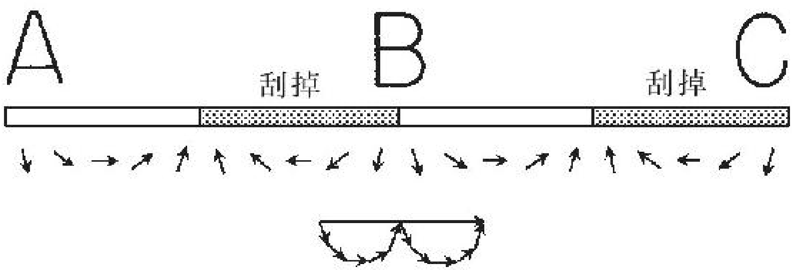


图26　如果将只偏某一指定方向（比如偏右）的箭头相加，而其他箭头都不考虑（由于它们代表的那部分镜面已被蚀刻掉），那么位于不恰当位置的这面镜子也会反射大量的光。经过这样蚀刻的镜子叫做衍射光栅。

这不是妙极了吗——你把一面镜子放在你本不指望它会有任何反射的地方，只把它的某种部分给刮下来，它居然反射了。①

我刚才给你们看的那片光栅是为红光制作的，对于蓝光，它就不起作用了；要想用于蓝光，得做新光栅，这时蚀刻掉的条纹彼此间要挨得更近些，因为正像我在第一讲中告诉你们的，记秒表对蓝光子记时的时候，表针要转得比对红光子快些。所以，那些特地为“红”转速设计的刻纹位置对于蓝光就不适用了。这时箭头会缠绕在一起，光栅就工作不灵了。但是，也有事出意外，如果我们把光电倍增管移到某个不同的角度，为红光制造的光栅就可以为蓝光工作了。这真是个幸运的意外——它是几何学干预的结果（见图27）。

如果你把白光射到光栅上，红光会从一个地方射出来，稍微靠上一点的是橙色光，然后是黄、绿、蓝色光——虹的全部颜色都会出现。如

果白光从适当角度照射到一列密集的沟纹上——比如一张唱片（或者录相盘就更好），人们常常能够看到七彩的颜色。大抵你们已经见过那些美妙的银色标记（在阳光充足的加利福尼亚，人们常把它们贴在车尾）：当汽车移动时，你们会看到非常鲜艳的颜色由红至蓝地变化。现在你们知道颜色是从哪里来的了：你们正在观看一个光栅——一面某些部分被恰到好处地处理掉了的镜子。太阳是光源，你的眼睛则是探测器。我还可以很容易地继续解释激光和全息图如何工作，不过我知道并不是所有的人都见过这些东西，而我还有许许多多的内容要讲，这个题目就到此为止吧！②

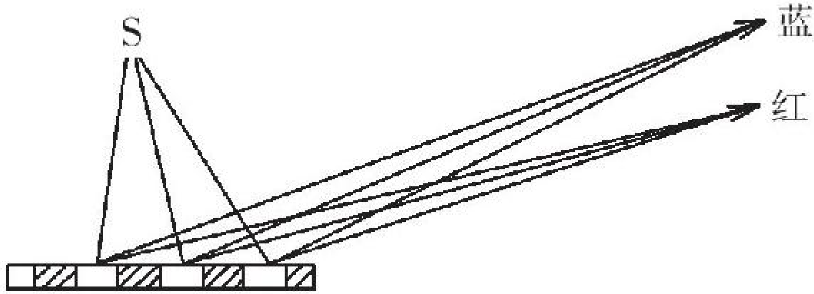


图27　如果把探测器换个地方，刻痕距离适合于红光的衍射光栅也可以为其他色光工作。这样，我们就有可能看到从刻有纹路的表面（如唱片）反射的不同颜色，至于看到何种颜色，则取决于角度。

光栅的例子说明了，我们不能忽视镜子上那些似乎不能进行反射的部分；如果对镜子做一些巧妙的处理，我们就能演示反射确实来自镜子各部分的这个事实真相，并制造出一些惊人的光学现象。

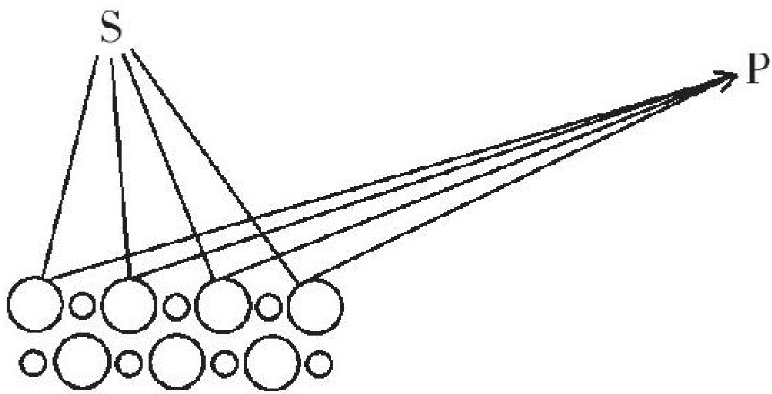


图28　自然界以晶体的形式制造了许多类型的衍射光栅。一个盐晶体以各种不同角度反射X射线（对X光记时的时候，想象中的记秒表针转动得极快——恐怕比可见光要快10000倍），从这些角度可以精确地确定各

原子的排列和间隔。

更重要的是，演示镜子所有部分都进行反射这个事实真相说明了，事件发生的每种可能的方式都有一个振幅。而且为了正确计算在不同情况下一个事件发生的概率，我们必须把代表事件发生的所有可能方式的箭头都加起来，而不是只加我们认为重要的那些箭头。

下面，我想讲讲比光栅更为人熟悉的现象——关于光从空气进入水中的现象。这次，我们把光电倍增管放在水下——假定实验员能够安排好这些事。光源是在空气中的S处，探测器是在水下的D处（见图29）。我们再次计算一个光子从光源到达探测器的概率。为了做这个计算，我们应该考虑光行进的所有可能路径。光行进的每一条可能路径都贡献一个小箭头，而且，同上面的例子一样，所有的小箭头长度都大致相同。我们可以再次绘制一张标明光子以通过各可能路径所需时间的曲线图。这个图的曲线将同我们原来绘制的光从镜面反射的那个图的曲线很相似：它始于最高点，然后向下，再返回向上；最重要的贡献来自箭头指向几乎同一方向的那些地方（在那里，一个路径与相邻路径所需时间相同），这就是曲线底部所对应的地方。这里也是所需时间最短的地方，所以我们要做的就是找出哪里是需时最短之处。

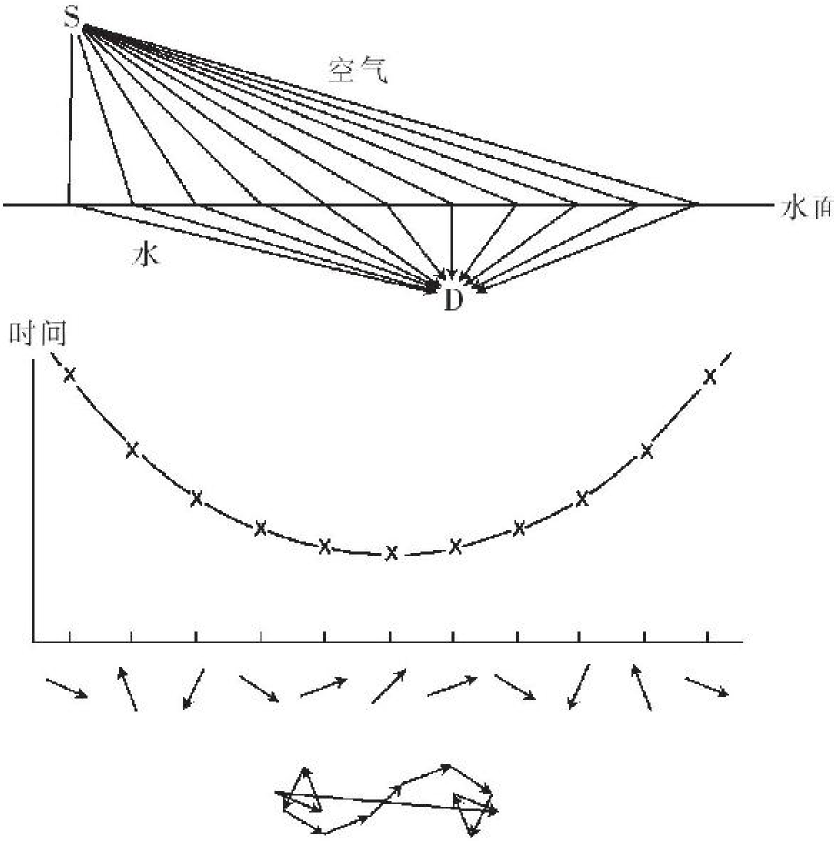


图29　量子理论告诉我们，光从空气中的光源到水中的探测器可有多种方式。如果把这个问题像前面处理镜子问题那样做简化处理的话，我们就可以画出一张各路径所需时间图，每个路径的下方标出与之对应的箭头的方向。我们再一次看到，对于最终箭头的长度做出主要贡献的，还是那些其箭头几乎指向相同（由于它们的计时几乎相同）的路径，而且再次看到，这是需时最短之处。

原来，光在水中行进看来要比在空气中慢些（在下一讲中，我将要解释为什么），这就使得光在水中通过的距离比在空气中通过的距离“昂贵”些（姑且用这个词吧）。要找出哪条路径需时最短并不难：假定你是游泳池救生员，坐在S处，这时在D处一个漂亮的姑娘快要淹死了（见图30）。你在陆地上跑要比在水中游泳快得多。问题是，为了最快到达那位出事的姑娘身边，你应该在何处入水？你会在A处入水，然后拼命游泳吗？当然不！但是你笔直地奔向出事人，在J处入水也并不是最快的路径。在这种人命关天的紧急当口，救生员如果先来一番分析、计算，那就太蠢了，但是可以估计出一个位置，从那里入水，用的时间最短：即在直路（过J点）和水中最短的路（过N点）之间的一条折衷路径。光的情况一样——最短时间路径的入水点在J和N之间，比如L。

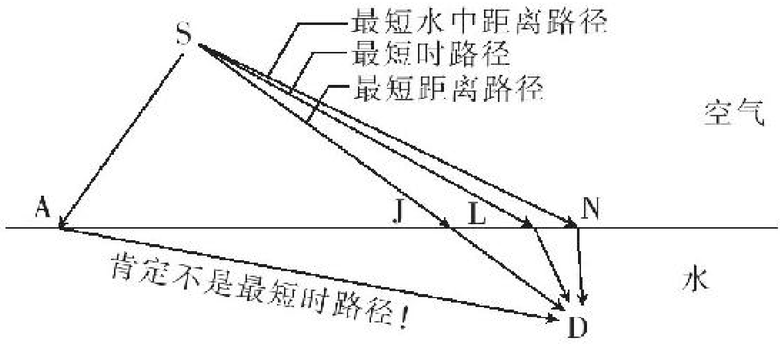


图30　要找出光以最短时间通过的路径，就象救生员要选择一条费时最少的路径去救人一样。这时他需要在陆地上跑一段，然后在水中游一段：距离最短的路径，需要游泳太多；需游泳最少的路径，在陆地上跑的路又太长；费时最少的路径是在这两者之间。

这里我想简短提一下另一个光现象，那就是海市蜃楼。在一条很热的路上开车时，有时你能够看到路上有水一样的东西。你实际看到的是天空。一般情况下，能看到路面上呈现天空，是因为路面上汪着水（光被单表面部分反射）。但路面上没有水时，你怎么能够看到天空在路面上呢？你们要知道，光在较冷的空气中行进得比在较热的空气中慢些。在看到海市蜃楼时，紧贴路面一定有层热空气，观察者则站在这层热空气之上的较冷空气里（见图31）。只要找出最短时路径，就可以理解为什么低头向下看居然就能看到天空——怎么居然会这样呢？我请你们回去拿这个问题消遣消遣——想想问题是很有意思的，而且这问题也容易想出来。

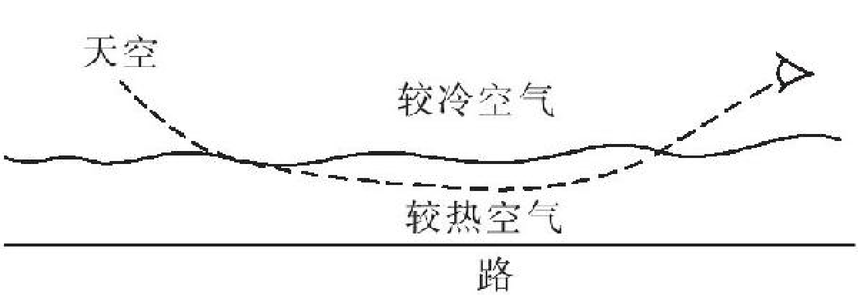


图31　求出最短时路径可以解释海市蜃楼是怎么回事。光在热空气中比在冷空气中行进得快些。天空似乎在路面上是因为来自天空的一些光从路面反上来到达我们的眼睛。天空似乎在路面上唯一的另一种情况就是路面上的水对天空的反射。这时的海市蜃楼就呈现在水面上。

在上面讲的光从镜子反射及光通过空气后入水的例子里，我做了近似处理：为了简单起见，我把光可能走的每条路径都画成了衔接在一起的两段直线——构成一个角的两直线。但事实上，并不是非得假设光在空气或水这类均匀介质中走直线不可；量子理论的一般原理——即一个

事件发生的概率的计算方法是把代表这个事件发生的所有可能的方式的箭头都加起来——甚至可以解释光为什么走直线。

所以，在下面这个例子里，我准备让你们看一看，把小箭头加起来怎么就能显示出光沿直线前进。我们把光源和光电倍增管分别放在S和P处（见图32），看看光从光源到探测器所能走的所有路径——包括所有各种弯路。我们给每条路径画个小箭头。好，现在请仔细听。

对于每一条弯路，例如路径A，都有一条和它紧邻、但比它稍直一点、也显然比它短的路——就是说，走这条稍直的路所需时间显然短得多。但是，在路径几乎变直的那些地方——例如，在C处，与它紧邻而稍直的路径所需时间与它几乎相同，正是在这些地方，箭头相加时，是相长而不是相消，这正是光行进的路径。

有一个很重要的问题应该注意，即在计算光从光源出发到达探测器的概率时，只计及代表通过D点的直路的那孤零零一个箭头是不够的（图32）。像通过C和E的那些相当接近直线的途径也都对概率做出重要贡献。所以，光并不真是只沿一条直线前进；它能“嗅出”与之邻近的那些路径，并在行进时，占用直线周围的一个小小的空间。（同样的道理，为了能正常反射，镜子也一定要有足够的大小：如果镜子小得无法容纳直线路径周围的邻近路径，那么，无论你把镜子放在何处，光都将沿许多方向散射。）

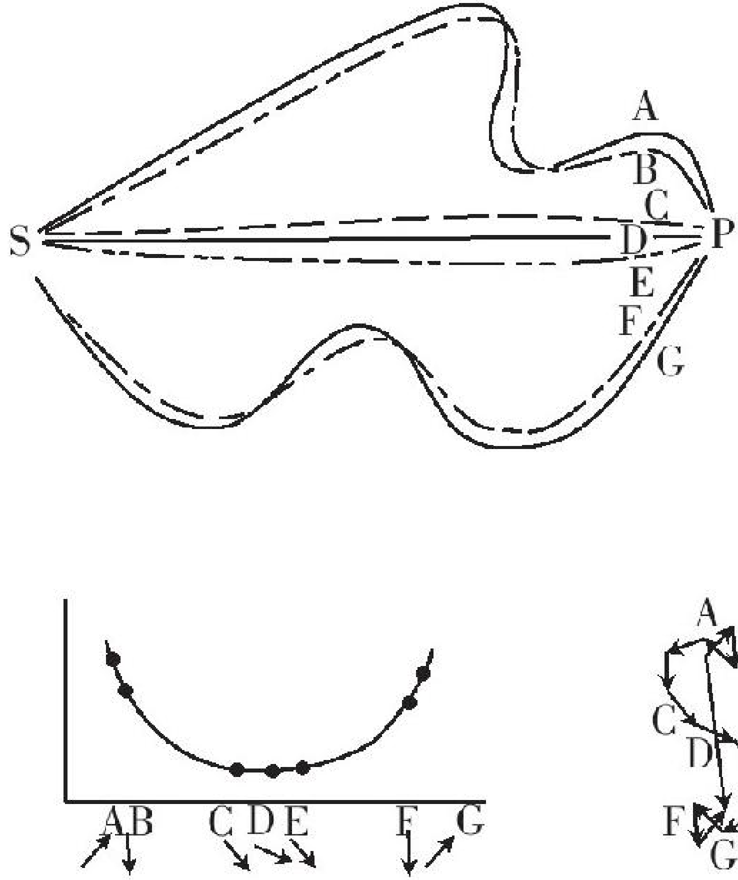


图32　量子理论能够用来说明光为什么看来是走直线的。在考虑所有可能路径时，每一条弯路都会有一条与之邻近、但距离短得多、费时也少得多（因而箭头方向大不相同）的路。只有在经D点的直线路径周围的那些路径，它们的箭头才有大致相同的方向，因为它们用的时间几乎相同。只有这些箭头才是重要的，因为靠它们我们才最终累积起一个大箭头。

我们现在比较仔细地研究一下这一小束光：把光源放在S处，光电倍增管在P处，S与P之间安放一对屏板，以防光路太散（见图33）。我们把第二个光电倍增管放在P下面的Q处，而且为简单起见，我们再次假设，光只沿由成一角度的两段直线构成的路径从S到达Q。好，我们看会怎么样呢？在两屏板之间的距离大得足以容纳多条彼此靠得很近的到达P和到达Q的路径时，到达P点诸路径的箭头相加时是彼此相长（因为所有到P点的路径都需要几乎相同的时间），而至Q点路径的箭头却都彼此相消（因为这些路径所需的时间大不相同）。所以，Q点的光电倍增管就不会作响。

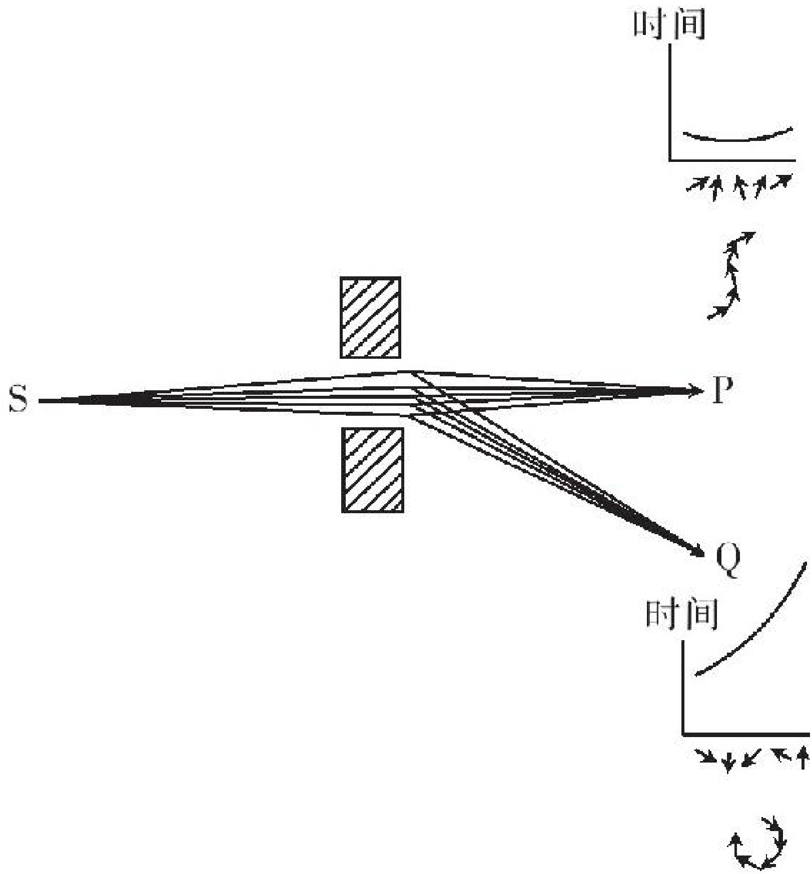


图33　光并不是只沿直线前进，它也沿直线周围的路径前进。如果两屏板之间距离宽得足以使这些邻近路径通过的话，那么光子一般是到达P，几乎不到达Q。

但是，让我们把两个屏板推得彼此越来越接近，当接近到某一程度时，Q处的探测器就开始作响！在两屏板间的空隙小到几乎要合拢，因而只有很少几条紧邻的路径可以通过时，到Q点的那些箭头也彼此相长了，因为它们所需时间也几乎没有差别（见图34）。当然，P、Q两处的最终箭头都是很小的，就是说无论是到P还是到Q都没有多少光通过这个小孔，而Q处探测器作响的次数几乎和P处的一样多！所以，当你试图把光路挤压得极窄以确定光只走一条直线时，光会由于你挤压得太窄而拒绝合作，并开始散射开来。③

所以说，光沿直线前进，只是一种习惯性的近似说法，用以描述我们熟知的自然界发生的事情；同样的，当我们说光从镜子反射，入射角等于反射角时，这也只是个粗略的近似。

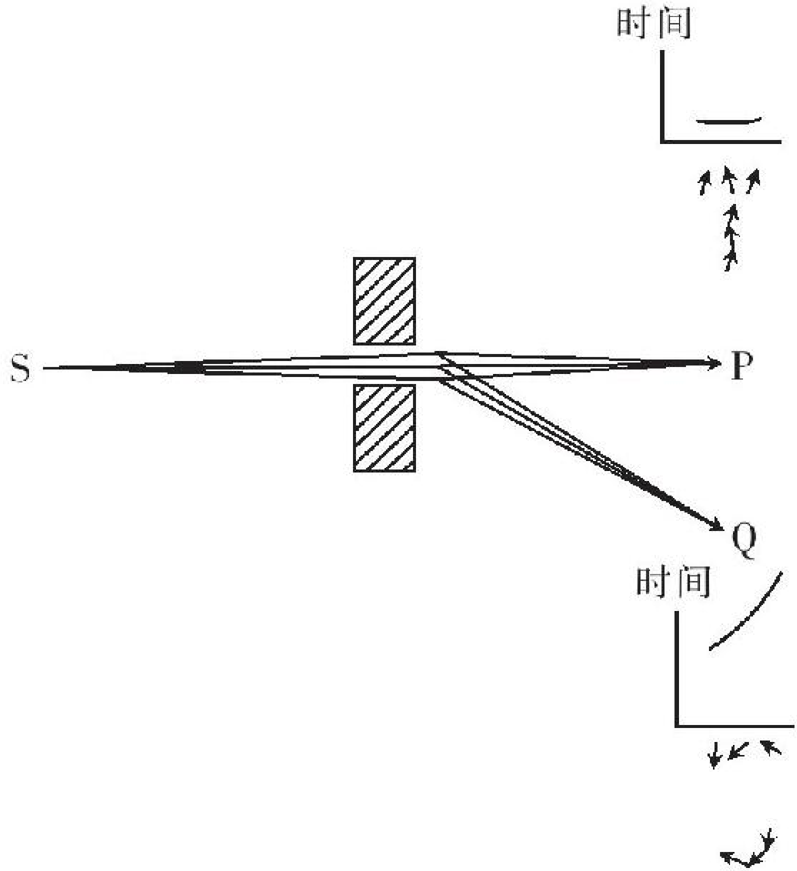


图34　如果光被拘束得很厉害，只有很少几条路可走时，在得以通过窄缝的光当中，到达Q的同到达P的几乎一样多，因为代表到达Q点的几条路径的箭头已经少到没什么可抵销的了。

正像我们能用聪明的小窍门使光从镜面上以多种角度反射出来一样，我们也能用类似的窍门使光从一点经多条途径到达另一点。

首先，为了使情况简化，我在光源和探测器之间画一条竖直的虚线（它没有什么意义，只是一条人为的线，见图35），并声明我们要考察的只是那些由成对的两直线构成的路径。图35表明，看来，每条路径的所需时间同镜面反射的情况一样（只是这次我把所需时间在旁边画出来）：这条曲线始于顶端的A，然后往内弯，因为中间的路径比较短，所以用的时间较短，最后这曲线再向外弯出来。

现在我们来做件好玩的事，让我们“骗骗”光：想个办法使所有这些路径都用完全相同的时间。怎样才能做到这点呢？我们怎样才能使经过M的最短路径和经过A的最长路径用完全相同的时间呢？

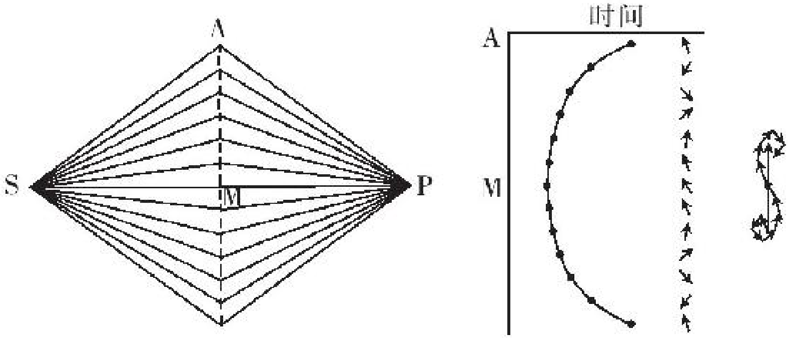


图35　我们把对从S至P所有可能路径的分析简化为只分析由许多成对的两直线构成的路径（都在同一平面上）。结果同较复杂的真实情况一样：那是一条有极小值的时间曲线，极小值处对最终箭头贡献最大。

好，我们看，光在水中行进得比在空气中慢些；它在玻璃中也比在空气中慢些（用玻璃我们就好控制多了！）。这样，如果在通过M的最短程处放置一厚薄适当的玻璃，我们就能使光走这条路用的时间与通过A的那条路径用的时间完全相同。与M邻近的那些路径，它们只是稍长了一点，玻璃不需要和M处玻璃一样厚（见图36）。离A越近，用来使光放慢速度的玻璃就越薄。如果对于每条路径，都把用于补偿光通过时间的玻璃的厚度计算出来，并按厚度把玻璃放上去，我们就能够使所有时间都相同。对于光可能走的每条路径都画出箭头，就会发现，我们已经一个接一个地把箭头都弄直了——确实有亿万个小箭头——所以纯结果是个意想不到的、大得惊人的最终箭头！当然，你知道我在这里讲的是什么：这就是聚焦透镜。如果安排得当，使所有的时间都相等，我们就可以把光聚焦——就是说，能以相当高的概率使光到达一指定地点，而到达任何其他地方的概率则很低。

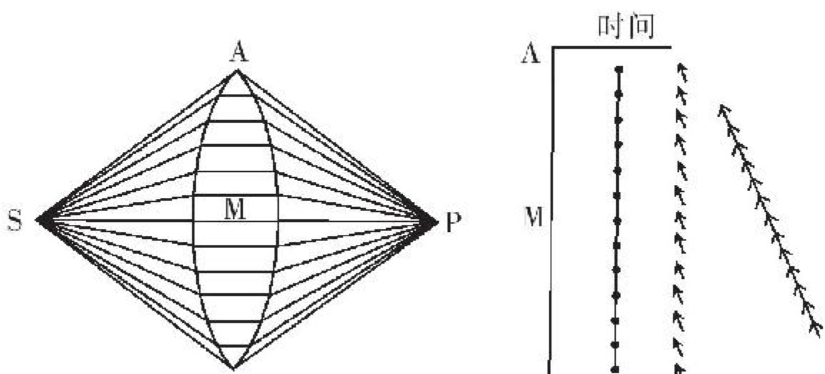


图36　让较短路径上的光放慢速度，是我们可对自然界耍的一个“花招”：将厚薄刚好适当的玻璃插入光路，使所有光路都需用完全相同的时间。结果所有箭头都指向同一方向，造成一个异常巨大的箭头——有大量的光通过。这种使光从光源到达另外单独一个点的概率大大增加的玻

璃叫做聚焦透镜。

我用这些例子向你们说明了，量子电动力学的理论初看起来是怎样的无缘无故和荒诞无稽，没有机理，一点儿也不真实，但它得出的结果却是你们大家都熟知的：光从镜面的反弹，光从空气进入水中时的弯曲，以及光被透镜聚焦。它还能得出其他你们也许见过、也许没见过的结果，比如衍射光栅等等。事实上，这个理论在解释光的所有现象时都一直是成功的。

我已经用几个例子给你们讲了，如何计算能以多种可择方式（alternative ways）发生的一个事件的概率：对一个事件发生的每一种可能方式画一个箭头，然后将所有箭头加起来。“把箭头加起来”的意思是使这些箭头首尾相连地接起来，然后画出“最终箭头”。最终箭头的平方就是这个事件发生的概率。

为了让你们再好好品尝品尝量子理论的风味，我现在给你们讲讲物理学家如何计算复合事件（compound events）的概率——复合事件是可被分为一系列步骤的事件，或是由数个独立发生的事情所组成的事件。

把我们的第一个实验——将几个红光子射向一块玻璃的单表面来测量部分反射——略加修改，就是一个复合事件的例子。现在我们在A点不放光电倍增管（见图37），而是放一个带孔的屏板，使到达A点的光子通过这个孔。然后在B点放置一块玻璃，在C点放一个光电倍增管。我们怎样才能求出一个光子从光源到达C的概率呢？

这个事件可以分作先后两步来考虑。第一步：一个光子从光源经玻璃的单表面反射到达A；第二步：这个光子从A经B处的玻璃反射而到达C处的光电倍增管。这两步中的每一步都有一个最终箭头——即“振幅”（我准备交替使用这些词），我们可用迄今我们所知道的规则把这两种最终箭头计算出来。第一步的振幅长度是0.2（它的平方是0.04，这就是光子从玻璃的单表面反射的概率），它转的角度是——例如说，转到2点钟（见图37）。

为了计算第二步的振幅，我们暂时把光源放在A，将光子瞄准A上方的那片玻璃。画出从前后两表面反射的箭头，并将它们加起来——比如说，最终箭头的长度为0.3，它转的角度是5点钟。

好，我们怎样才能将这两个箭头合起来画出整个事件的振幅呢？我们以一种新方式看待这两个箭头：把它们看成是一个缩短和旋转的指令。

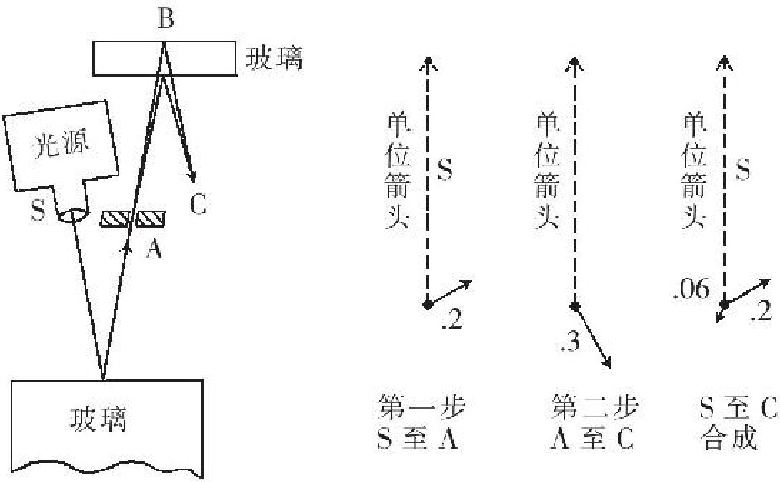


图37　一个复合事件可以分解为一系列相继步骤。在这个例子里，光子从S到C的路径可分为两步：1）一个光子从S到A；2）这个光子再从A到C。这两步可以分开来分析，每一步的结果是一个箭头，我们可以用新眼光来看待这个箭头：把它看作是由一个单位箭头（长度为1、指向12点钟的箭头）缩短和旋转得到的。在这个例子里，第一步是缩短至0.2，转到2点钟；第二步是缩短至0.3，转到5点钟。要得到这先后两步的振幅，就要相继地缩和转：一个单位箭头缩至0.2，转到2点钟，之后，把这得到的箭头作为单位箭头，再缩至0.3，转到5点钟，最后得到的是一个长度为0.06、指向7点钟的箭头。这个连续缩、转的程序就叫“箭头相乘”。

在这个例子里，第一个振幅的长度是0.2，并指向2点钟的方向。若从“单位箭头”（unit arrow）——长度为1、指向上方的箭头——开始，我们可把它的长度从1缩短到0.2，并将它的指向从12点旋转到2点。第二步的振幅可以想象为将单位箭头从1缩短到0.3，并将它从12点转到5点。

好，现在我们把这两步的振幅合起来，即接连两次缩短并旋转。第一次，我们将单位箭头从1缩短至0.2，然后将它从12点的方向旋转到2点；接着，进一步将0.2缩短至0.2的3/10，再旋转一个相当于从12点到5点的角度——就是说从2点旋转到7点。最后我们得到一个箭头，它的长度为0.06，指向是7点钟。它所代表的概率是0.06的平方，即0.0036。

仔细观察这几个箭头可以看出，连续缩短和旋转两个箭头等同于将两者的角度相加（2点加上5点），而将它们的长度相乘（0.2×0.3）。要理解为什么要将角度相加是容易的：箭头的角度取决于想象中记秒表指针旋转的多少。这样，接连两步的旋转总和就只不过是第一步的旋转量与第二步再次旋转的量之和。

关于为什么我们把这过程叫做“箭头相乘”（multiplying arrows），我想稍微多解释两句，费点时间，但很有意思。让我们先从古希腊人的观点，看看什么是乘法（这与我们这个讲座没有什么关系）。古希腊人想使用一些并非一定是整数的数，所以他们用线段来代表数。任何一个数都可以用单位线段的变换——将它展长或缩短——来代表。例如，如果线段A是单位线段（见图38），则线段B代表2，线段C代表3。

那么，我们怎样表示3乘以2呢？方法就是连续变换。开始，我们以线段A作为单位长度，将它展长2倍，再展长3倍（或者先展长3倍，再展长2倍——先后顺序没有关系）。结果就得到线段D，它的长度代表6。那么1/3乘以1/2又怎么办呢？这次，我们以线段D为单位长度，把它缩短到1/2（成为线段C），再将线段C缩短到1/3，结果就是线段A，它代表1/6。

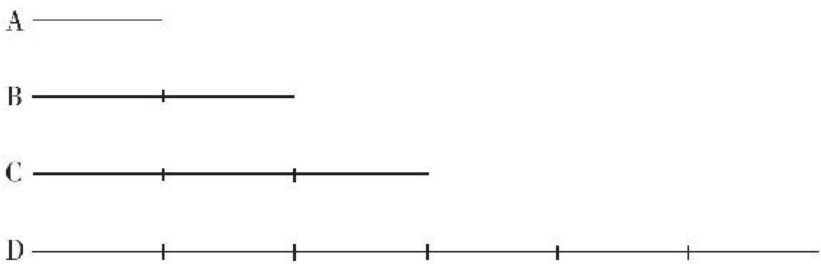


图38　将一个单位长度展长缩短，改造一番，我们就可以表示任何一个数。若A是单位长，B就代表2（展长），C就代表3（展长）。通过连续变换可达至线段相乘。比方，3乘以2就意味着将单位长展3倍再展2倍，得到的答案是展长到6（线段D）。若D是单位长，线段C就代表1/2（缩短），线段B代表1/3（缩短），而1/2乘以1/3意味着单位线段D缩短到1/2，然后再将1/2缩短到它的1/3，得到的答案是缩短到1/6（线段A）。

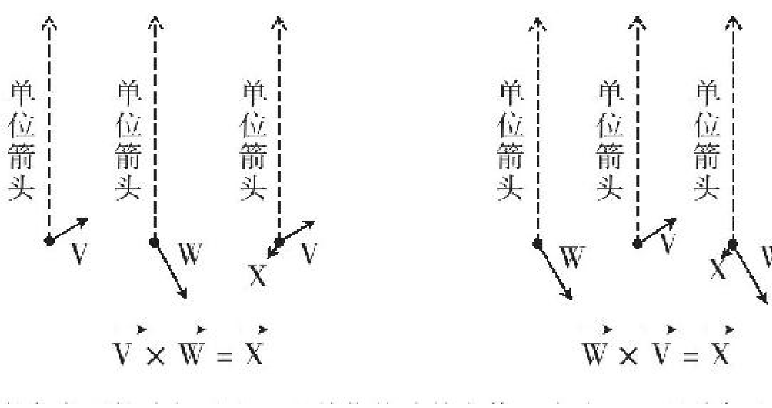


图39　数学家发现箭头相乘也可用单位箭头的变换（在这里，是缩短和旋转）来表示。通过连续变换就可将箭头相乘。同普通乘法的情况一样，先后顺序并不重要：箭头V乘以箭头W或箭头W乘以箭头V得到的答

案都是箭头X。

将箭头相乘的作法是一样的（见图39）。我们对单位箭头施行连续变换——只是每次变换涉及两个动作：缩短和旋转。为了让箭头V乘以W，我们先将单位箭头按V的规定量缩短并旋转，然后按W的规定量缩短并旋转——再说一次，顺序无所谓。这样看来，箭头相乘时所遵从的连续变换规则同普通数字相乘时的一样。④

现在让我们把相继步骤（successive steps）这个概念记在脑子里，返回头去看看第一讲中的第一个实验——单表面的部分反射（见图40）。我们可将反射的路径分为三步：1）光从光源向下到玻璃；2）被玻璃反射；3）从玻璃向上到探测器。每一步都可以看作是单位箭头的一定量的缩短和旋转。

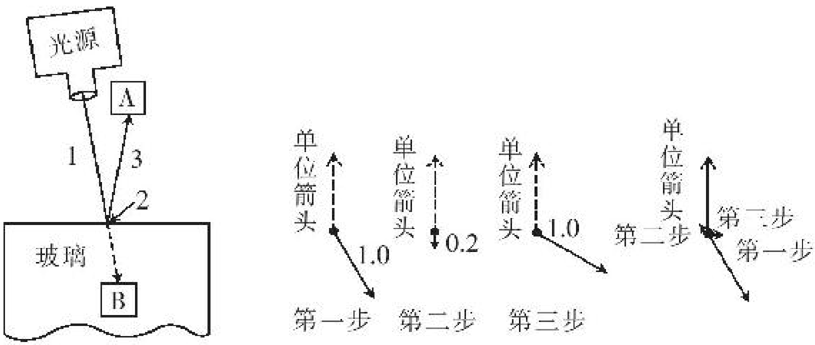


图40　单表面的反射可分成三步，每一步都是一个单位长度的缩短和（或）旋转。纯结果——长度为0.2的指向某个方向的箭头——是一样的，但我们现在的分析方法却细致多了。

你们会记得，在第一讲里我们并没有考虑光从玻璃反射的所有可能的途径——要考虑所有途径，我们就得画出许许多多的小箭头，并将它们相加。为避免所有这些细节，我给了你们这样一个印象，即光是向下到达玻璃上的某一特定点——光并不散开。但当光从一点走到另一点时，它事实上是散开了（除非它为透镜所哄骗），这个过程伴随着单位箭头的某种缩短。不过，暂时我还愿意坚持光并不散开这个简化的观点，这样就可以不考虑这种缩短。同时，由于光不散开，我们也可以假设每个离开光源的光子都会终止于A或B。

这样，在第一步里，没有缩短，但有旋转——它对应着想象中的记秒表在对一个光子从光源到达玻璃前表面计时时指针所旋转的角度。在这个例子里，这第一步的箭头长度为1，指向某个角度——例如说，5点钟的角度。

第二步是光子为玻璃所反射。这里有个相当可观的缩短——从1到0.2——和半圈的旋转。（这些数字在现在看来是荒唐可笑的：它们取决

于是为玻璃还是为其他物质所反射。在第三讲中我还要讲这个问题！）这样，第二步就由长度为0.2、方向为6点钟的指向（半圈）所代表。

最后一步是光子从玻璃返上来到达探测器。这里，和第一步一样，没有缩短，但有旋转——比如说，这次光子走的距离比第一步略短点，箭头指向4点钟。

我们现将箭头1、2、3连续相乘（角度相加、长度相乘）。这三步——1）旋转；2）缩短并旋转半圈；3）旋转——的净效果和第一讲中的一样：第一步和第三步的旋转量（5点钟加4点钟）同我们让记秒表记录光跑完全程得到的旋转量（9点钟）是一样的；第二步另转的半圈则使箭头的指向与记秒表针的方向恰好相反，这与第一讲中讲的情况完全一样。在第二步中箭头缩至0.2，使我们得到长度为0.2的箭头，它的平方就代表了单表面情况下观测到的部分反射率4%。

在这个实验中，有一个问题，我们在第一讲中没有讨论，这就是跑到B处的光子——被玻璃透射的那些光子——怎么样呢？光子到达B处的振幅，其长度必须是0.98左右，因为0.98×0.98＝0.9604，它相当接近于96%。这个振幅也可以分为若干步骤来分析（见图41）。

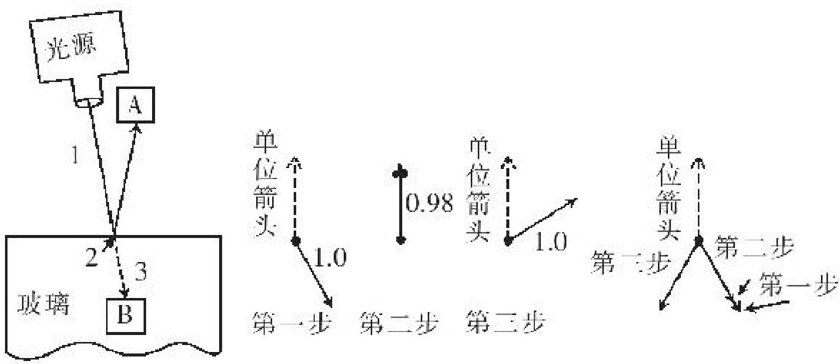


图41　单表面的透射也可分为三步，伴随每一步的都是一个缩短和（或）一个旋转。一个长度为0.98的箭头，其平方约为0.96，这表示透射概率为96%（将它同4%的反射概率加起来，共是100%的光）。

这第一步和到A的路径的第一步一样——光子从光源向下到玻璃上——单位箭头转到5点钟。

第二步是光子穿过玻璃表面——透射时，箭头无需旋转，只是缩短一点——缩至0.98。

第三步——光子穿过玻璃的内部——这涉及一个附加的旋转而无缩短。

最后的净结果是，长度为0.98的箭头旋转到某个方向，它的平方代

表一个光子到达B的概率——96%。

现在让我们再来看看两表面的部分反射。前表面的反射与单表面的反射相同，所以前表面反射的三步就同我们刚才看到的一样（图40）。

后表面的反射可以分解为七步（见图42）。它包括旋转和缩短。旋转是记秒表在对光子全程（第一、三、五、七步）记时的时候，记秒表针旋转的总量，缩短是先缩至0.2（第四步），还有两次都是缩到0.98（第2、6步）。结果箭头的方向与原来的一样，但长度大约为0.192（0.98×0.2×0.98），它与第一讲中我说的0.2很接近。

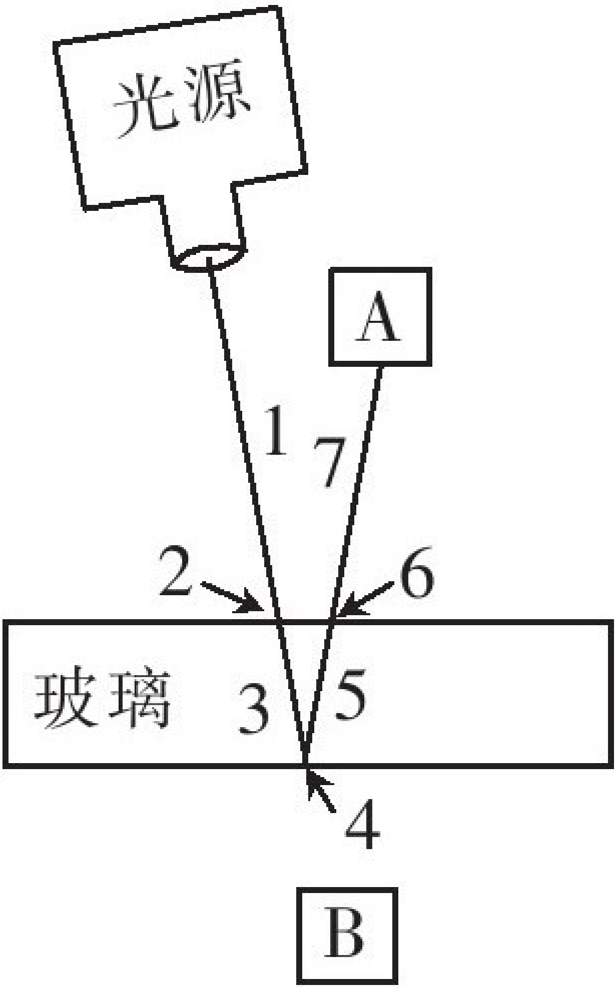


图42　从玻璃后表面的反射可以分为七步：第一、三、五和七步仅有旋转；第二、六步都缩至0.98，第四步则缩至0.2。结果是一个长度为

0.192（它与第一讲中的0.2很接近）的箭头——旋转的角度相当于想象中的记秒表指针旋转的总量。

综上所述，玻璃对光的反射和透射的规则是：1）光通过空气至玻璃前表面再返回空气的反射包括一次缩短至0.2和旋转半圈；2）光从玻璃后表面反射再返回玻璃，这也包括一次缩短至0.2，但没有旋转；3）从空气到玻璃或从玻璃到空气的透射都包括一次缩短至0.98，在这两种情况下都没有旋转。

好事讲得太多了恐怕也不太好。不过我还是禁不住要给你们再举一个绝妙的例子，说明事情是如何进行的，以及如何使用这些相继步骤的规则对它们进行分析。让我们把探测器移到玻璃下方某处，考虑第一讲我们没有谈到的问题——玻璃的两表面透射的概率（见图43）。

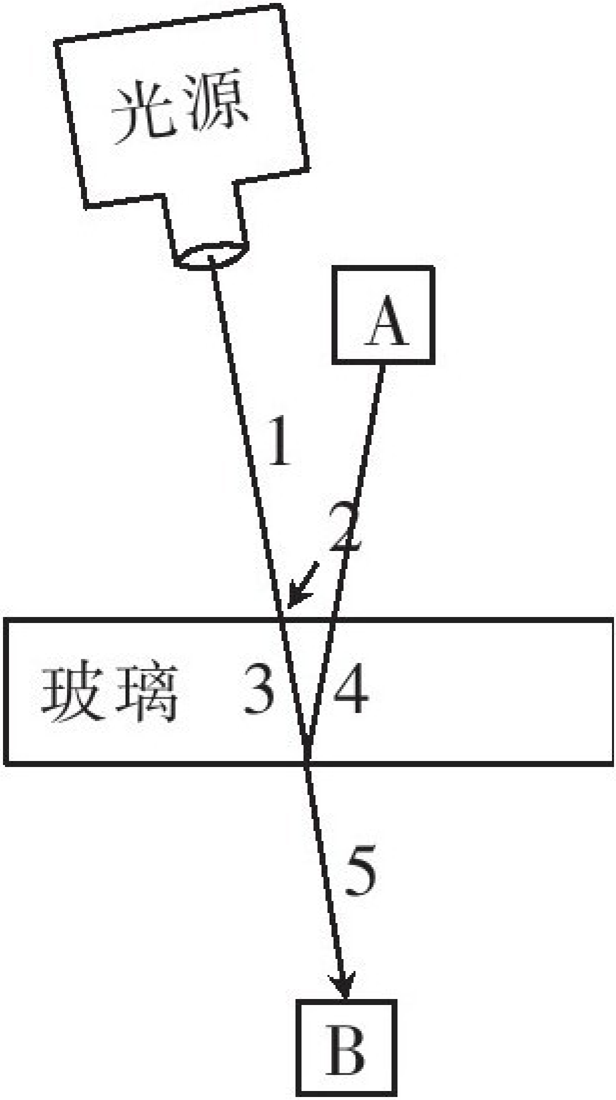


图43　两表面的透射可分为五步：第二步将一个单位长度缩短至0.98，第四步将这0.98又缩至其0.98，两次缩短后长度约0.96：第一、三、五步仅涉及旋转。结果，最终箭头的长度是0.96，它的平方是约0.92，代表两表面透射的概率为92%（它对应于我们所期望的反射值8%，就是“一天正确两次”的那个值）。若玻璃的层厚恰好使反射的概率达16%，那么加上透射概率的92%，计算出来的光岂不成了108%！这个分析一定在什么地方出了毛病。

当然，答案你们是知道的：光子到达B的概率就是从100%减去我们

前面已经计算过的到达A的概率。这样，如果得出到达A的机会是7%，那么到达B的机会一定是93%，如果到达A的机会从零经过8%到16%（由于玻璃厚度不同，概率也不同）之间变化，到达B的概率就从100%经过92%到84%。

这个答案是正确的，但我们期望的是将所有的概率用最终箭头平方的办法计算出来。如何计算出光从一片玻璃透射出来的振幅箭头呢？又如何将这个箭头的长度改变、安排得适当，以在所有情况下都同到达A的长度相匹配，使得到达A的概率与到达B的概率相加永远精确地等于100%呢？让我们稍微仔细地看一看。

一个光子从光源到玻璃下方B处的探测器，可分五步走。让我们按这五步一边走，一边缩短和旋转一个单位箭头。

前三步与上边的例子相同：光子从光源到玻璃（旋转，无缩短）；光子经前表面透射（无旋转，缩短至0.98）；光子穿过玻璃（旋转，无缩短）。

第四步——光子穿过玻璃的后表面——在缩短和旋转上与第二步相同：无旋转，但缩短至0.98的0.98，所以现在箭头的长度应为0.96。

最后，光子再次穿过空气，下落到探测器上——这意味着旋转得更多些，但不再缩短。结果是箭头的长度为0.96，指向则由记秒表针的连续转动来确定。

一个长度为0.96的箭头，代表概率约为92%（0.96的平方），这意味着离开光源的100个光子中平均有92个到达B处。这也意味着8%的光子经两表面反射后到达A。但我们在第一讲中说过，所谓两表面的反射为8%仅仅在某些时候才是对的（“一天正确两次”）——实际上随着玻璃厚度的不断增加，两表面的反射概率以零至16%的循环而起伏变动。那么，当玻璃的厚度正好使得部分反射为16%的时候怎么样呢？因为每100个离开光源的光子中，有16个到达A，92个到达B，这岂不意味着我们计算出来的是108%的光了吗？——真怪透了！一定是哪里出毛病了。

原来，毛病出在我们忽略了光可以通过所有路径到达B这一点上！例如，光可以从后表面弹回，通过玻璃，好像它准备奔到A去似的，但它又被前表面反射回来，返落向B（见图44）。这个路径共九步。让我们逐一看一看，在光通过这九步中的每一步时，单位箭头发生了怎样的变化。（别担心，无非就是缩短和旋转！）

第一步：光子通过空气——旋转，无缩短；第二步：光子进入玻璃——无旋转，但缩短至0.98；第三步：光子通过玻璃——旋转，无缩短；第四步：由后表面反射回来——无旋转，但缩短至0.98的0.2，即0.196；第五步：光子返上去通过玻璃——旋转，无缩短；第六步：光子被前表面（它实际上应叫“后”表面，因为这个光子现处于玻璃之中）

反回——无旋转，但缩短至0.196的0.2，即0.0392；第七步：光子向下返回来通过玻璃——旋转得更多，无缩短；第八步：光子穿过后表面——无旋转，但缩短至0.0392的0.98，即0.0384；最后，第九步：光子通过空气到达探测器——旋转，无缩短。

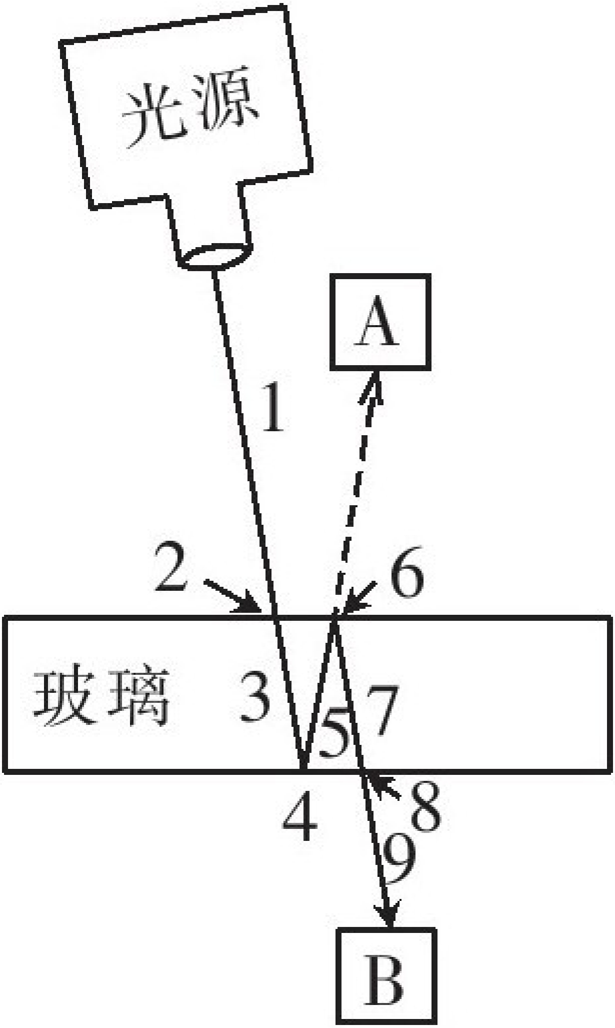


图44　为使计算更加精确，必须计及光可能为两表面透射的另一条路径。它包括：两次缩短到0.98（第二、八步），两次缩短到0.2（第四、六步），结果箭头的长度为0.0384.（接近于0.04）。

经过所有这些缩短和旋转，所得结果是长度为0.0384（在实际应用的各种场合，我们都可以说它就是0.04）的振幅，它的角度就是一个光子通过这个较长的全程时，为它记时的记秒表所旋转的角度。这个箭头

可以代表光从光源到达B的第二种可能的方式。现在我们有了两种不同的方式，必须把这两个箭头加起来——对应于较直接路径的箭头，长度是0.96，对应于较长路径的箭头，长度是0.04——这就是最终箭头。

这两个箭头的方向通常是不同的，因为当玻璃厚度改变时，0.04箭头对0.96箭头的相对方向就改变了。但是，请看一看事情竟有多妙：记秒表在对光子的第三、五两步（当它奔向A时）记时时的多余旋转，竟恰恰等于在对第五、七两步（当它奔向B时）记时时的多余旋转。这意味着当这两个反射的箭头相互抵销而最终箭头表示零反射时，透射的箭头就相互加强，使箭头的长度为0.96＋0.04，即1，就是说，如果反射的概率为零，透射的概率就是100%（见图45）。当反射的箭头相互加强，使振幅为0.4时，透射的箭头会相互抵销，造成0.96-0.04（即0.92）的振幅长度，就是说当反射的计算值为16%时，透射的计算值将为84%（0.92的平方）。你们看看，大自然在制订她的规则时是多么聪明啊，她使我们在计算光子数时，永远能把它们计算为100%。⑤

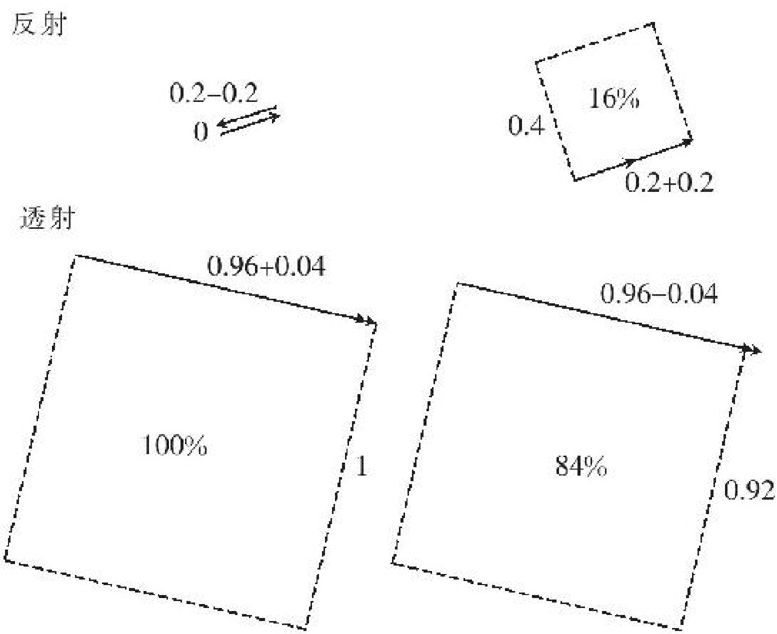


图45　大自然总是保证使所计及的光为100%。如果厚度刚巧使透射箭头彼此相长，那么反射箭头就会彼此相消；如果反射箭头彼此相长，透射的箭头就彼此相消。

最后，在这一讲结束之前，我想再给你们讲讲箭头相乘的规则有个引申：箭头相乘不仅是针对一个事件包含几个相继步骤的情况，而且还针对一个事件由几个相伴发生（即相互独立且可能同时发生）事件组成的情况。例如，假定我们有两个光源X和Y，两个探测器A和B（见图47），我们想计算这样一个事件的概率，即在X和Y各失去一个光子之后，A和B各得一个光子的概率。

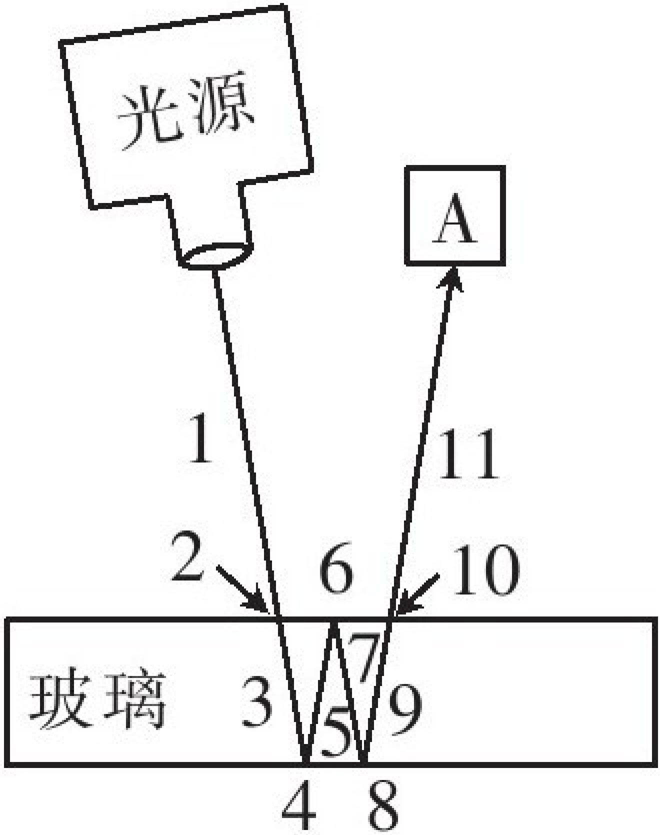


图46　对于更精确的计算，光反射的其他路径也应该计及。在这个图中，第2、10两步是缩短至0.98，第4、6、8三步是缩短至0.2，结果是长度约为0.008的箭头，它是反射的另一路径，因此应同代表反射的其他箭头（从前表面反射的0.2，后表面的0.192）加在一起。

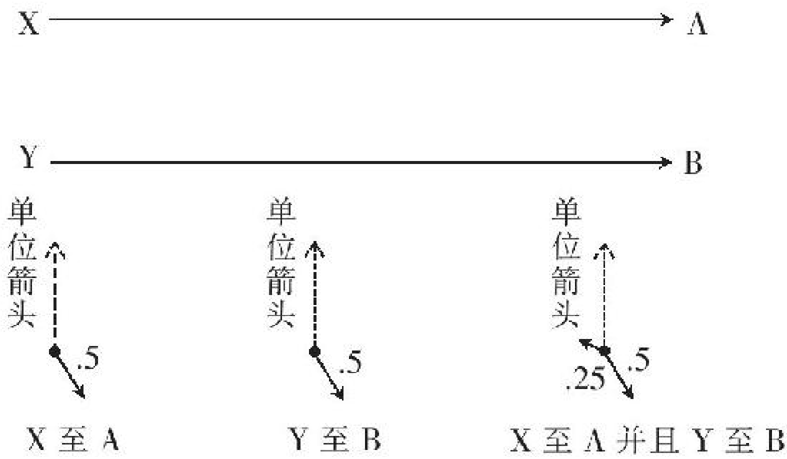


图47　如果某特定事件可能发生的方式之一取决于几个相互独立发生的事件，那么计算此方式的振幅就是将这几个独立事件的箭头相乘。在这个情况下，最终事件是在X和Y都失去一个光子之后，光电倍增管A和B各响了一声。这个事件发生的一种可能的方式是，一个光子从X到A，另一个光子是从Y到B（两个独立事件）。为了计算这“第一种方式”的概率，每个独立事件（X到A和Y到B）的箭头要相乘，以得到这个特定方式的振幅（图48将继续分析）。

在这个例子中，光子通过空间到达探测器——既不反射也不透射，这是个好机会，使我可以讨论过去一直未予注意的现象：光在前进中分散开来。现在我要告诉你们计算单色光通过空间从一点到另一点的完整规则——不是近似，也不是简化。我们所知道的关于单色光在空间通过的全部内容（不考虑偏振或极化【polarization】）就是：箭头的角度取决于想象中的记秒表指针，光子每前进一英寸，它就转动一定的圈数（转多少圈取决于光子的颜色）；箭头的长度则同光通过的距离成反比——换句话说，光越向前，箭头就越短。⑥

让我们假设，从X到A这条路径的箭头长度为0.5，指向是5点钟，从Y到B的箭头也是一样（图47）。将一个箭头乘以另一个箭头，得到最终箭头的长度为0.25，指向是10点钟。

但是，且慢！这个事件还可能以另一种方式发生：从X出来的光子可能到B，从Y出来的光子到A。这两个“子事件”（subevents）都有各自的振幅，它们的箭头也必须画下来并相乘，这样就得出了此事件能以这种特殊方式发生的振幅（见图48）。因为同箭头旋转的量相比，箭头随距离增加而缩短的量要小得多。这样，X到B及Y到A的距离与X到A及Y到B的距离基本上一样，均为0.5，但它们旋转的量却大为不同：试想对红光来说，每前进一英寸记秒表指针旋转36　000圈，这样，距离上极小的变化都会导致计时上的重大差异。

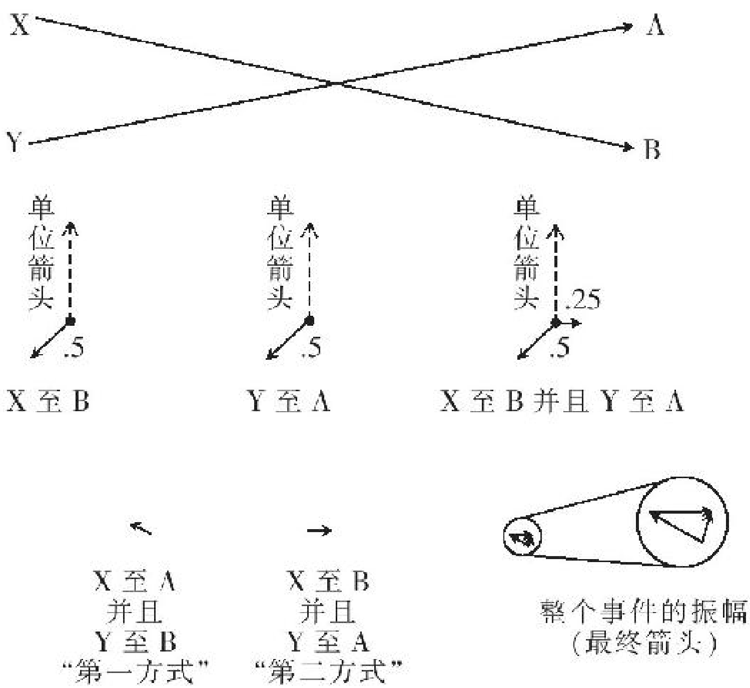


图48　图47所描绘的事件还可能以另一种方式发生，（一个光子从X到B，一个光子从Y到A），它也取决于两个独立发生的事件。这样，这“第二种方式”的振幅也是用这两个独立事件的箭头相乘的方法计算。最后，将“第一种方式”和“第二种方式”加在一起，得到事件的最终箭头。一个事件的可能性总是用单一的最终箭头来表示——无论在计算过程中画出多少个箭头，并把它们相乘、相加。

将这个事件发生的所有可能方式的振幅都加起来就得到最终箭头。这些振幅的长度大致相同，所以当它们方向相反时，就会相互抵销掉。如果改变光源与探测器之间的距离，两个箭头之间的相对方向就会改变，就是说只要将探测器移向或远离光源一点点，就可能使事件的概率大为增加或完全抵销掉，就像两表面部分反射的情况一样。⑦

在这个例子里，将箭头相乘，再相加，就得出了最终箭头（这个事件的振幅），它的平方就是这个事件的概率。这里要特别强调的是，无论要画出多少个箭头，并把它们相加或相乘，我们的目的是计算此事件的单一最终箭头。学物理的学生最初常犯的错误就是因为没有把这个重要的观点牢记在心。学生们对涉及一单个光子的事件要做很长的分析，大概是过程太长把他们弄糊涂了，他们往往不知怎么的开始把箭头与光子联系在一起。而这些箭头是概率振幅，平方后就得出完整事件的概率。⑧

下一讲我将开始把物质的性质作简化并给出解释——解释缩短至0.2

倍是从哪里来的，为什么光通过玻璃或水比通过空气要慢些，等等——因为到目前，我一直在“行骗”：光子并不是真的从玻璃表面反弹回去；它们是在和玻璃内部的电子相互作用。我将要给你们讲，光子所做的无非就是从一个电子走向另一个电子，还要讲反射和透射实际上就是电子接受了一个光子，“揪下它的头”，（姑且这么说吧！）并放出一个新光子的结果。对迄今为止我们讨论的所有问题而言，这个简化是很漂亮的。

注释

①镜子上那些其箭头指向偏左的区域也会造成强反射（如果把箭头指向其他方向的区域都刮掉的话）。只是在偏左和偏右两区域一起反射时，它们才相互抵销掉了。这同两表面的部分反射相类似：虽然每个表面各自反射各自的，但如果玻璃的厚度恰好使这两个表面分别贡献出来的箭头方向相反，反射就被抵销掉了。

②我禁不住要给你们谈谈大自然造就的一个光栅：食盐晶体，它是钠原子和氯原子按规则码垛起来的。这种交替式图形就像我们制造的带有刻痕的镜子，只要颜色适当的光（在这种情况下是X射线）照射到上面，就可以起到光栅的作用。一旦找到探测器能接收到大量这种特殊反射（称为衍射）的位置，人们就能很精确地确定条纹之间相隔多远，因而得知原子之间相距多大（见图28）。这是一种确定所有各类晶体的结构以及证实X射线和光是同类东西的漂亮办法。首次进行这类实验是在1914年（应为1912年——译注），那时人们怀着兴奋激动的心情第一次细致地看到了不同物质的原子是怎样码垛在一起的。

③这是“不确定性原理”（uncertainty principle）的一个例子：关于光在两屏板间走哪条路和此后走哪条路这两个知识之间有一种“互补”关系——想两者全都精确地知道是不可能的！我愿意把不确定性原理放在它的历史地位上来考察：在量子物理的革命性思想刚刚提出来时，人们还力求借老式的概念（如光走直线）去理解它们。但是，到一定的时候，老式概念开始不灵了，于是出现了这样的警告：事实上，“当……时，你那个老式概念就一文不值了。”如果你放弃所有老式概念，换用我在这个系列讲座中给你们讲解的思想——将一个事件发生的所有可能方式的箭头都加起来——“不确定性原理”就不再需要了。

④数学家一直在尽力找出所有服从代数规则（A＋B＝B＋A，A×B＝B×A，等等）的东西。这些规则当初是为正整数（人们用来数苹果呀、人呀这类东西）制订的。后来，人们发明了零、分数、无理数（不能用两个整数之比表示的数），以及负数，使数的概念有了很大发展，但这些数仍然服从代数的原始规则。数学家发明的有些数最初让人难以接受——比如半个人这样的概念就是难以想象的——但是今天就完全没有困难了，在听到某地区每平方英里平均有3.2人时，再没有人会产生道德上的不安，或血淋淋的难过感觉。人们并不力求想象0.2个人是什么样，而是懂得3.2意味着：如果把3.2乘上10，就得到32。这样，那些

满足代数规则的东西可能使数学家感兴趣，即使它们并不永远代表真实情况。一个平面上的诸箭头可用首尾相连的办法“相加”，或以连续旋转和缩短的方式“相乘”。由于这些箭头与普通的数服从同样的代数规则，数学家把它们也叫做数。但为了把它们与普通的数区分开来，就叫它们为“复数”（complex numbers）。对你们当中学过复数的人，我本来也许会用这样的说法：“一个事件的概率就是一个复数的绝对平方。若一个事件能以各种可择的方式发生，你就将这些复数加到一起；如果它只能以若干相继的步骤发生，你就将这些复数乘起来。”这种说法可能听起来给人印象深一些，但这并不比我以前所讲的多点什么内容——我只不过是用了不同的语言。

⑤你也许会注意到，为了使计得的光子为100%，我们将0.0384改为0.04，并用84%作为0.92的平方。但是当把所有的箭头都加到一起时，0.0384和84%就无需四舍五人了。所有那些零七八碎的箭头（代表光的所有可能走的路径）都将相互补偿，保持答案正确。你们中如果有谁对这类事情有兴趣，这里有个例子，是光从光源到达探测器A可走的另一条路——一组三反射（和两个透射），结果，最终箭头是$0.98 \times 0.2 \times 0.2 \times 0.2 \times 0.98$，即约为0.008，这是个很小的箭头（见图46）。要对两表面的部分反射做完整的计算，你就得把所有这些箭头都加起来，还要加上甚至更小的、代表五反射的箭头，等等。

⑥在学校里你们学过，光量的改变同光传播距离的平方成反比，它可以用来验证我们这里所讲的规则，因为箭头缩至原来大小的一半，它的平方就变为原来的1/4。

⑦这个现象叫做“汉伯瑞-布朗-特威斯效应”（Hanbury-Brown-Twisseffect），利用它可以区分宇宙深处的无线电波单源和双源，即使两个源彼此靠得极近也没有问题。

⑧记住这个原理会帮助学生避免被“波包退化”（reduction of a wave packet）之类的东西弄糊涂了。

3.电子和它们的相互作用

这是关于一个相当困难的课题——量子电动力学理论——的四讲中的第三讲。今晚在座的人数显然比以前多，所以你们中间没有听过前两讲的人会发现这一讲几乎不可思议。那些已经听过前两讲的人也会发现这一讲不可思议。但你们知道，这没关系：正像我在第一讲中解释的那样，我们不得不用以描述自然界的方式，一般来说，对我们就是不可思议的。

在这几讲中我想给你们讲一讲物理学中我们了解得最好的部分，即光和电子的相互作用。你们熟悉的大部分现象——如全部化学和生物学的现象——都涉及光和电子的相互作用。量子电动力学这个理论能将所有现象（除引力现象和核现象外）囊括其中。

在第一讲中我们就已知道，即使对一个最简单的现象，例如光在玻璃上的部分反射，我们也没有一个令人满意的机制去描述它。我们也无法预测某一给定光子是穿过玻璃，还是为这块玻璃所反射。我们唯一能做的就是计算某一特定事件将要发生的概率——对于我们刚说的情况，就是预测光是否将被反射。（当光向下直射到玻璃的单表面时，被反射的概率是4%；当光更倾斜地打到玻璃上时，反射的概率就增加。）

我们在处理一般情况下的概率问题时，有如下“合成规则”（rules of composition）：1）若某事件可以各种待选的方式发生，我们把所有的不同方式的概率都加起来；2）如果这事件是作为一系列相继步骤出现——或者它的出现依赖于同时但独立发生的几个事件——我们就将所有步骤（或事件）的概率乘起来。

在量子物理这个奇异而美妙的世界里，计算概率的方法是将箭头的长度平方：我们遇到的情况假如在一般情况下是需要将概率相加，我们就把箭头加起来；如果在一般情况下是需将概率相乘，我们就把箭头乘起来。用这种方法计算概率所得的特定答案与实验结果完美地符合。为了理解大自然，我们必须求助这类古怪的规则和奇特的推理，对这点我感到非常高兴，而且很愿意向人讲解。对大自然做这种分析的背后没有“轮子和齿轮”；如果你想理解大自然，你只能采取这个方法。

在开始这一讲的主要内容之前，我想再给你们举个例子说明光的行为是怎样的。我想讲的是一种非常弱的单色光——一次只有一个光子——从光源S出来，到达探测器D（见图49）。在光源和探测器之间放一个屏板，屏板上A、B两处开两个很小的孔，两孔的间距为几毫米。（如果光源与探测器之间距离为100厘米，孔就必须小于1/10毫米。）令A在S和D的联线上，B在A旁边的某处，不在S和D的联线上。

在关上B孔时，D处会作响数次，这表示有光子通过了A（例如平均起来，在离开S的每100个光子中，探测器作响一次，即1%）。如果关上A孔，打开B孔，从第二讲知道，平均说来，我们会得到差不多相同数量的作响声，因为两个孔都非常小。（如果我们把光“挤压”（squeeze）得太厉害，通常情况下的规则——如光走直线——将归于无效。）如果两个孔都打开，我们得到的是一个复杂的答案，因为干涉出现了：如果两个孔以某个距离分开，得到的作响声要多于所期望的2%（极大值约为4%）；如果两孔距离稍变一变，会完全得不到作响声。

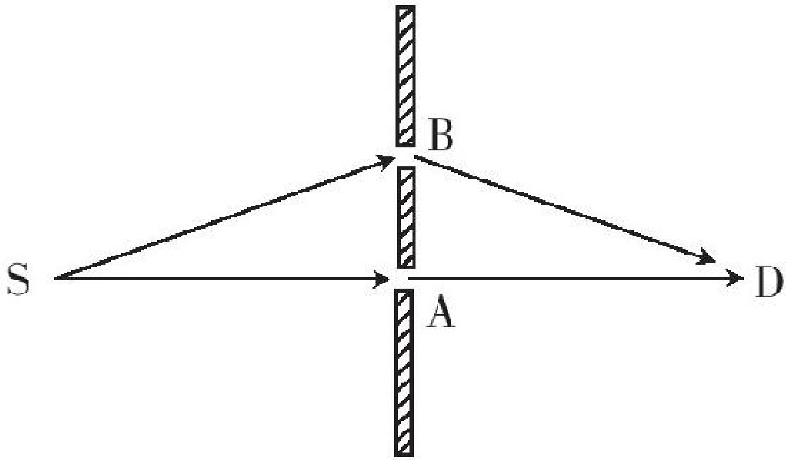


图49　光源S与探测器D之间屏板上的两个小孔（在A和B处），无论哪一个开着，光通过的量都是一样（在这种情况下是1%）。如果两个孔都开着，就会发生“干涉”：探测器发出声响的时间会从0至4%不等，这取决于A、B相距的远近——见图51（a）。

人们一般会认为，打开第二个孔永远会使到达探测器的光量增加，但实际上不是这么回事，所以光“或走这条路或走那条路”的说法是错误的。我偶尔也说“那么，这光或走这条路或走那条路”这种话，但是当我这么说的时候，我须记住我的意思是说把振幅加起来；这光子以某一振幅走一条路，并以另一振幅走另一条路。如果振幅彼此相反，光就不可能到达探测器——即使两个孔都是打开的。

对大自然的这个奇异现象有种极大的误解，我现在就想给你们谈谈这个问题。假定我们安放两个特殊的探测器——一个放在A，一个放在B（要设计一种能告知我们是否有光子通过的探测器是可能的）——这样在两个孔都打开时我们就可以知道光子是通过哪个孔了（见图50）。由于一单个光子从S到达D的概率仅受两孔之间距离的影响，所以一定是有某种诡秘的方法将这个光子一分为二，然后又回到一处，合二而一，对吗？根据这个假说，A、B两处的探测器应该总是一起作响，（强度可能是各一半吧？）而D处的探测器作响的概率应是从0到4%，具体数值取决于A、B之间的距离。

但实际的情况是：A、B两处的探测器从来不同时作响——永远是或A作响，或B作响，一个光子并不一分为二；它或走这条路，或走那条路。而且，在这种情况下，D处的探测器有2%的时间作响——这是A、B两处概率的简单相加（1%＋1%），这2%不受A与B之间距离的影响；在A、B两处安放探测器时，干涉消失了。

这个现象是大自然已经编制好了的，所以，我们将永远也琢磨不透她是怎么弄的：如果为了发现光走哪条路而把仪器安置进去，倒是能知道光走哪条路，但是，好，这一下美妙的干涉效应消失了。如果我们把能告诉我们光走哪条路的仪器撤掉，干涉现象又回来了！——确实非常奇妙！

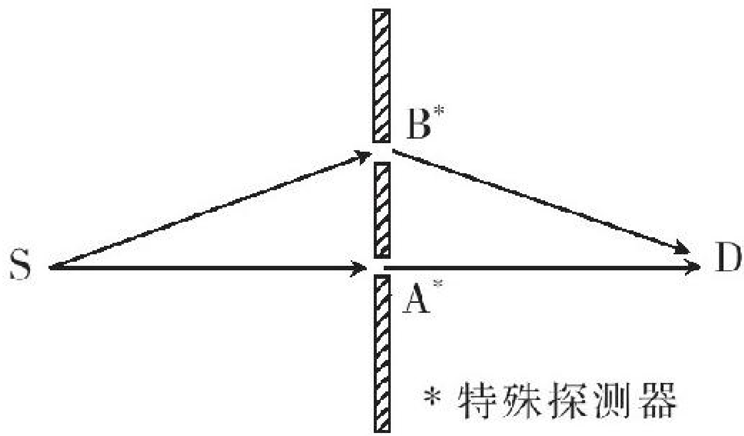


图50　如果在A、B两处各放一个特殊的探测器，用以告知若两个孔都开着，光走的是哪条路，这个实验已经变了，因为（在你检测这两个孔时）一个光子永远是只穿过这个孔，或只穿过那个孔。这样就有两种相互可区别开来的最终情况：1）A和D处的探测器作响；2）B和D处的探测器作响，每种情况发生的概率大约为1%，两种情况发生的概率以普通方式加起来，这就是D处的探测器以2%的概率作响的原因——见图51（b）。

为了理解这个怪事，让我提醒你注意下面这个很重要的原则：为了正确地计算一个事件的概率，人们必须小心地把一个完整事件定义清楚——特别是实验的初始状态和最终状态到底是什么。你要看看实验前后的仪器，找找发生了哪些变化。在我们计算一个光子从S到D的概率，而A、B两处又无探测器时，这个事件就只不过是D处一声作响。当D处的一声作响是状态的唯一变化时，我们无法说出光子走的是哪条路，所以存在着干涉。

如果在A、B两处放置探测器，我们就把问题改变了。原来，这里有两个完整事件——两组最终状态——它们是可以区分开的：1）A、D两

处的探测器作响；2）B、D两处的探测器作响。当实验中存在着几个可能的最终状态时，我们必须把每一个最终状态都作为独立的完整事件来计算概率。

为了计算A、D两处探测器作响这个状态下的振幅，我们将表示下列几个步骤的箭头乘起来：一个光子从S到A，这个光子再从A到D，使D处的探测器作响。最终箭头的平方就是这个事件的概率——1%，这个值与B处的孔关闭时的值相同，因为这两种情况的步骤完全相同。另一个完整的事件是B和D处的探测器作响，这个事件的概率用相同的方式计算，结果也与上面一样——约为1%。

如果我们想知道的是D处的探测器作响有多么频繁，而不管在这过程中是A处还是B处的探测器作响过，那么这个概率就是这两个事件概率的简单相加——2%。原则上说，如果在这个系统中放入了什么使我们能够用来观测，以得知光子是从哪条路过来的，我们就会有不同的“终态”（final states，即可以区分的最终状态），我们将把每个终态的概率（不是振幅）加起来。①

我在前面已经指出了自然界是多么难以捉摸，你对自然界行为之奇特了解得越多，就越难制造一个模型来解释哪怕是最简单的现象实际上是如何发生的。所以，理论物理学就放弃做这种努力。

在第一讲里我们已经看到一个事件怎样能分成不同的方式，而每一种方式的箭头怎么能“加”起来。在第二讲中我们看到了每一种方式又如何能分解为若干相继步骤，每一步的箭头如何看做是单位箭头变换的结果，而这些箭头如何由连续的缩短和旋转而“乘”起来。这样对于画出并合成箭头（这些箭头代表了诸小事件），以得出最终箭头（它的平方就是所观测的物理事件的概率）的全部有关规则我们就都熟悉了。

人们不免要担心，我们这种把事件分割为越来越简单的子事件的作法到底能进行到哪步为止？可能的最小事件是什么？可用来构成涉及光与电子的所有现象的小事件其数量是否有限？在量子电动力学的语言中，有没有数量有限的“字母”（1etters）可用来组成“字词”（words）和“短语”（phrases），以描述几乎所有的自然现象？

答案是：有；字母数是三。我们仅需三种基本作用就能得出所有与光和电子有关的现象。

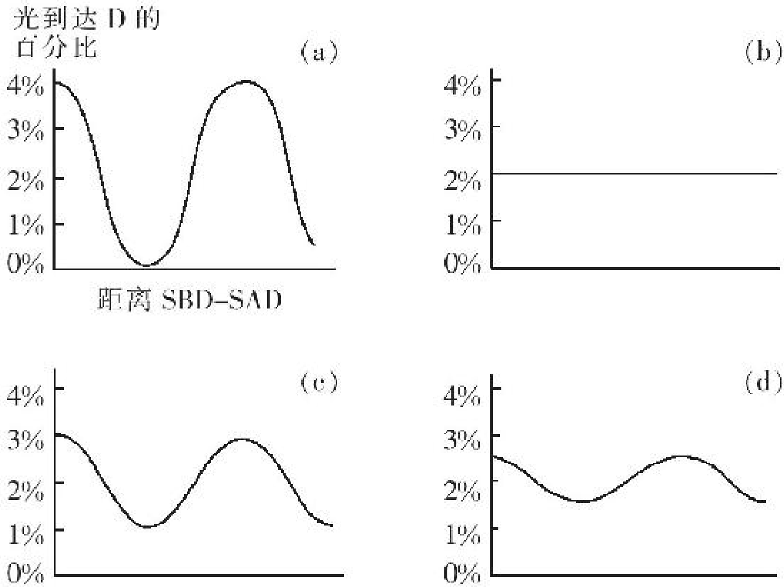


图51　如果A、B处没有探测器，那就有干涉——光量是从零至4%（a）。如果A、B两处有百分之百可靠的探测器，那就没有干涉——到达D处的光量为恒定的2%（b）。如果A、B两处的探测器不是100%可靠（就是说，有时A、B两处明明应该探测到光子，但它们却毫无动静），那就有三个最终状态：A和D作响；B和D作响：D单独作响。这样，最终曲线就是三种可能的最终状态所做贡献的混合。A、B两处的探测器可靠性越差，干涉就越多。将（c）与（d）相比，情况（c）的探测器的可靠性要比（d）差。与干涉有关的原理是：对于几种可能的不同最终状态，须先独立求每一种最终状态的概率（将其有关箭头相加，并将最终箭头的长度平方）；然后再把几个概率按一般方式加到一起。

在告诉你们这三种基本作用是什么之前，我应当在这里适当地介绍一下作用者，作用者是光子和电子。光子——光的粒子——在前两个讲座中已讲得不少了。电子是1895年作为粒子发现的（电子是1897年由J·J·汤姆逊（J.J.Thomson）发现的。——译注）：你可以对电子计数；你也可以把一个电子放在油滴上测量它的电荷。后来逐渐清楚了，用这种粒子的运动可以说明电线中的电流。

发现电子后不久，原子被想象为一个小小的太阳系，它由重的部分（称为核）和这些沿“轨道”运转的电子组成，这些电子很像绕太阳旋转的行星。如果你认为原子就是这样，那你就返回到了1910年。（应该说是1913年，这一年N·波尔（Niels　Bohr）提出了原子中电子绕核旋转的模型——译注。）1924年德·布罗意（Louis　De　Broglie）发现有一种类似波动的特性与电子相关联，稍后不久，贝尔实验室（Bell Laboratories）的C·J·戴维逊（C.J.Davis-son）和L·H·革末（L.H.Germer）用电子轰击了镍晶体。结果电子反弹回来的角度妙极了

（就和X射线返回的角度一样），这些角度完全可以用德·布罗意关于电子波长的公式计算出来。

当我们从大尺度上——和记秒表转一周相应的距离比起来要大得多——看光子时，我们看到的现象与诸如“光走直线”这类规则很接近，这是因为在最短时间路径的周围有相当大量的路径在相互加强，而相当大量的其他路径则相互抵销掉了。但是，在光子运动的空间变得太小时（比如在屏上的很小的孔洞），这些规则就不起作用了——我们发现光并不走直线，两孔之间会形成干涉等等。同样的情况也存在于电子。从大尺度看，电子象粒子一样沿一些明确的路径运动。但从小尺度看，例如在原子内部，空间已经小到没有主要路径可言，没有“轨道”了；所有的路径电子都可能走，每条路径都有个振幅。干涉现象变得很重要，我们只有把所有的箭头都加起来才能预言电子可能在什么地方。

有趣的是我们注意到电子首先被人看作是粒子，它的波动特性是后来发现的。光的情况相反，除了牛顿犯了个错误而认为光是“微粒”以外，光是首先被看作像波动一样，它具有像粒子一样的特性是后来才发现的。事实上，这两种物体的行为是多少有点像波动，又多少有点像粒子。为了省点事，别创造诸如“波动子”（wavicles）这类新词，我们就把这些物体称作“粒子”，但我们大家都知道，它们都服从我上面解释过的画出并合成箭头的那些规则。显然自然界中所有粒子——夸克、胶子、中微子等等（下一讲中我们将讨论它们）——都是按量子力学的方式行事的。

好，现在我告诉你们那三种基本作用——光和电子的所有现象都是由它们引起的——是什么。

——作用1：一个光子从一处至另一处。

——作用2：一个电子从一处至另一处。

——作用3：一个电子发射或吸收一个光子。

这些作用中每一个都有个振幅——即一个箭头，根据一定的规则，可以把它计算出来。等一下我将告诉你们这些规则（或定律）是什么。有了这些规则，我们可以把整个世界给造出来。（原子核和万有引力永远除外！）

好，现在我们要讲的是，这些作用发生的舞台并不仅仅是空间，而是空间和时间。迄今，我们没有考虑和时间有关的问题，例如，准确地说来，光子究竟是何时离开光源，又是何时到达探测器。空间实际上是三维的，但我准备在图表中把它简化为一维，这样，我准备在作图时把一个特定物体在空间的位置用水平轴表示，时间则用竖直轴表示。

我准备在空间和时间（或者说时空【space-time】，我可能会不经意地这么称它）里作的第一个图就是“棒球停定”（见图52）。

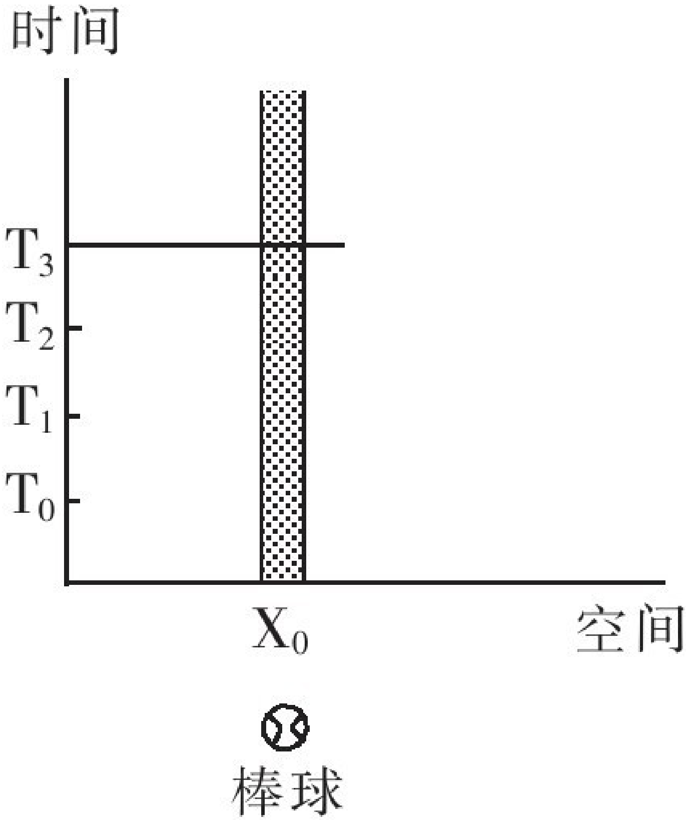


图52　宇宙中所有的活动都发生在空间-时间这个舞台上。通常考虑的时空是四维（三维用于空间，一维用于时间），这里的时空将用二维来表示（水平方向上的一维用于空间，竖直方向上的一维用于时间）。我们每一次看棒球时（如在时间T_3），它都处于同一地点。这样就产生了一个“棒球带”，当时间前移时，这条带笔直向上延伸。

在星期四上午（我标为T_0），棒球位于空间某处（我标为X_0）。片刻之后，在T_1，它还占据相同的空间，因为棒球还在那里停定未动。稍后，在T_2时，棒球仍在X_0点，这样，停定不动的棒球的图就是一一条竖直的带，笔直向上，棒球永远处于带中。

如果我们让棒球飘在失重的外层空间，垂直地向一堵墙飘去，那又会怎样呢？比如，星期四的上午（T_0），它从X_0开始（见图53），过一会儿，它就不在同一位置了，它飘移了一点，到了X_1。棒球在继续飘移时，它就在时空图上造出一个倾斜的“棒球带”，棒球撞墙（墙总是立在那里，所以图形是条竖直的带）后，从另一条路返回，这条路和它从空间X_0点来的路完全一样，只不过在不同的时间点（T_6）到达X_0。

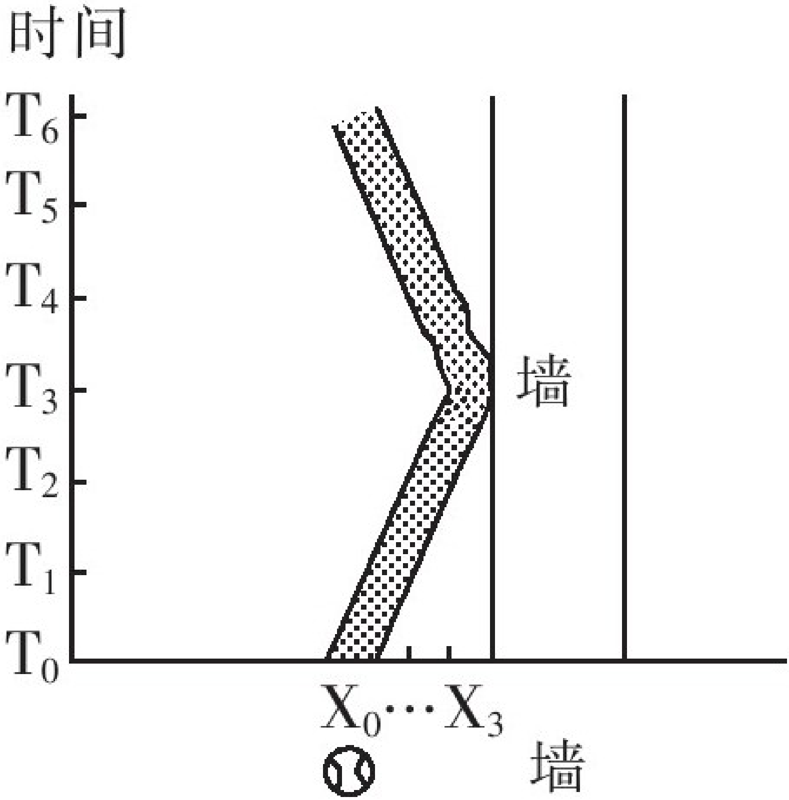


图53　一个棒球沿与一堵墙成直角的路向这堵墙飘去，然后反弹回来到达初始位置（在图的下面示出），这棒球在一维空间运动，并呈现出一个倾斜的“棒球带”。在时间T_1和T_2，棒球向墙接近；在T_3，它撞到墙上，并开始返回。

至于时间的尺度，不用秒，而用比秒小得多的单位则非常方便。因为我们的对象是光子和电子，它们运动得极快。我准备用45°代表以光速运动的物体。例如，一个粒子以光速从X_1 T_1运动到X_2 T_2，X_1、X_2之间的水平距离与T_1、T_2之间的竖直距离相等（见图54）。为了使45°代表一个以光速运动的粒子，我们让时间以一个我们称之为c的量作为因子向前延伸，你们会看到c这个字符在爱因斯坦（Albert Einstein）的公式里到处飞舞，这是由于这些公式不幸选用了秒作为时间单位，而没有用光飞过一米所需的时间作时间单位。

现在，让我们仔细看一看第一种基本作用——光子从一处运动到另一处。我将用A与B之间的波纹线（没有什么特别的理由）画出这个作用。这里，我得多加小心，我应该说，已知在某时刻位于某地点的光子，以某一定的振幅于某时刻到达另一地点。在我的时空图（见图55）上，点A（即在X_1和T_1）的光子有一定的振幅在点B（即X_2和T_2）处出现。我会把这个振幅的大小叫做P（A至B）。

关于这个箭头即P（A至B）的大小，有一个公式。这个公式是大自然几个伟大定律之一，而且很简单。P值取决于两点间的距离之差和时间之差。这两个差值可以用数学的方法②表示为（X_2-X_1）和（T_2-T_1）。

对P（A至B）作出主要贡献的是光的寻常速度（这时X_2-X_1等于T_2-T_1），人们期望的是光永远以寻常速度前进，但是光以比寻常光速快（或慢）些的速度前进的振幅也是存在的。在上一讲中，你们已经知道光并不是仅沿直线前进，现在，你们又知道了，光也不是仅以光速前进。

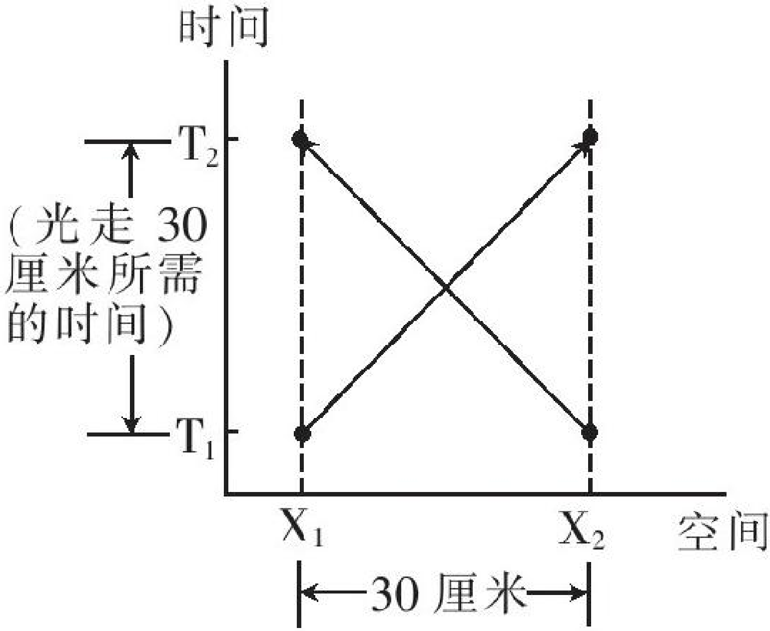


图54

图54　我在这些图中使用的时间尺度将使以光速运动的粒子是以45度角在时空图上运动。光走30厘米，（从X_1至X_2或X_2至X_1）所用的时间大约是十亿分之一秒。

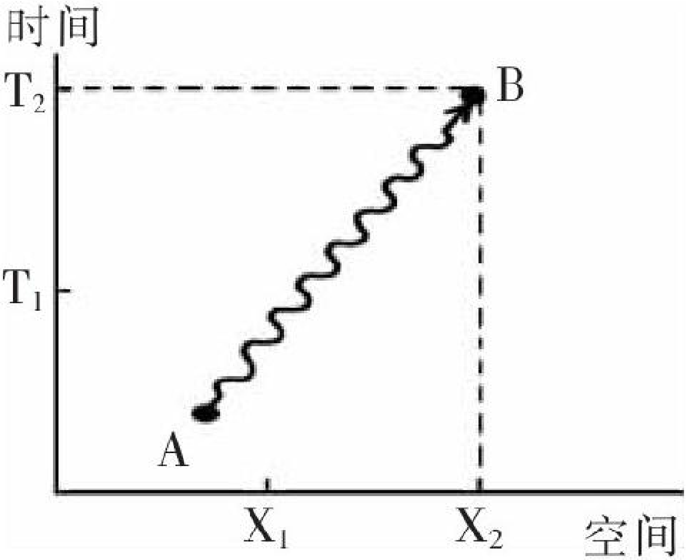


图55

图55　一个光子（以波纹线表示）以一个振幅从时空图中一点（A）至另一点（B），这个振幅我将称之为P（A至B），它的计算公式仅取决于地点之差（X_2-X_1）和时间之差（T_2-T_1），事实上，它是这二者方差[即“间隔”I，可以写为（X_2-X_1）2-（T_2-T_1）2]的倒数这样一个简单函数。

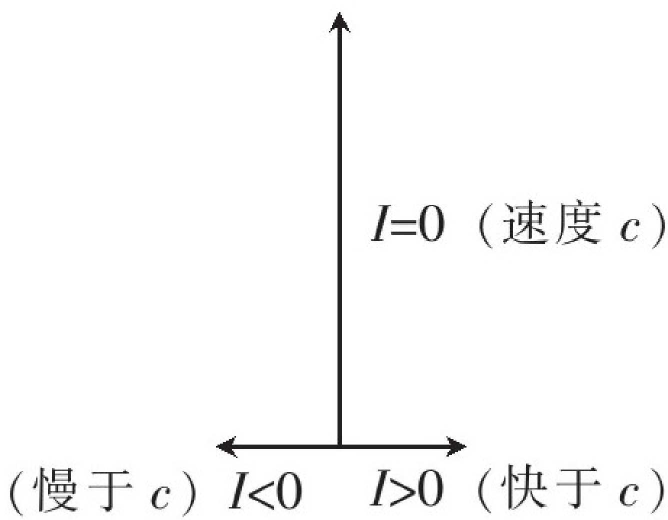


图56　光以速度c运行时，“间隔”I等于零，对12点钟的方向贡献很大。

当I大于零时，对3点钟的方向有个小贡献，其大小与I成反比；I小于零时，对九点钟的方向有同样大小的贡献。这样光就有快于或慢于寻常光速的振幅，但这些振幅在长距离上便被抵销了。

光以快于或慢于寻常速度c的速度前进这种情况的振幅不等于零，这可能会使你感到奇怪。同寻常速度c的贡献相比，这些可能性的振幅是很小的。事实上，光在长距离运行中，它们都抵销掉了。但是，当距离很短时（我们下面将要画的许多图就属于这种情况）这些其他的可能性就变得相当重要，而必须予以考虑。

这就是第一种基本作用，物理学的第一个基本定律——一个光子从一点至另一点。它可以解释全部光学问题，它就是关于光的全部理论！不过，这么说也不全对，我保留了极化或偏振没谈，还有就是光和物质的相互作用没谈，后面这个问题将把我们引到第二个定律。

奠定量子电动力学基础的第二种基本作用是：一个电子在时空图中从A点到B点。（暂时把这个电子想象为一个简化的虚电子，它没有极化，就是物理学家所谓的“零自旋”（spin-zero）的电子。实际上，电子确有一种极化，不过它对主要概念没有添加多少东西，只不过使公式略复杂一些。）我把这个作用的振幅称为E（A至B），它的大小也取决于（X_2-X_1）和（T_2-T_1）（与注释②中描述的组合相同），以及被称为“n”的数，n这个数一旦确定下来，就能使我们所有的计算结果同实验相一致。（以后我们会讲到如何确定这个“n”值。）E的计算公式相当复杂，我很遗憾不知如何用简单的话加以解释。但是，你可能很愿意知道这么一点，即如果n＝0，那么P（A至B）——即一个光子在时空图中从一点到另一点——的计算公式同E（A至B）——一个电子从时空图中的一点到另一点——的计算公式是一样的。③

第三种基本作用是：一个电子发射或吸收一个光子——我将把这种作用叫做“联接”（junction）或“耦合”（coupling），叫什么名称倒是无所谓。为了在我的图上把电子和光子区别开来，电子在时空图上的移动用直线标出。这样，每一次耦合都是两条直线同一条波纹线联接在一起（见图58）。关于释放或吸收一个光子的振幅并没有什么复杂的公式，它也不取决于任何其他量，它就是一个“数”，我把这个决定联接的数称为j，其值是-0.1左右：即缩短约1/10，并旋转半圈。④

好了，几种基本作用我就都讲完了。只是极化我没有讲，极化使问题稍稍复杂一点，我们总把它略去不加考虑。下一步的事情是把这三种作用合在一起来表达更复杂一点的情况。

作为第一个例子，我们计算一下位于时空图上1、2两点的两个电子终止于3、4两点的概率（见图59）。这个事件可以几种方式发生。第一种方式是位于1的电子走到3，——计算时，我们把1、3代入E（A至B）的公式，写作E（1至3）——和位于2的电子走到4——用E（2至4）计算。这是两个相伴发生的子事件，所以这两个箭头相乘就可以得出事件

以第一种方式发生的箭头。这样，我们将这“第一方式箭头”写作E（1至3）×E（2至4）。

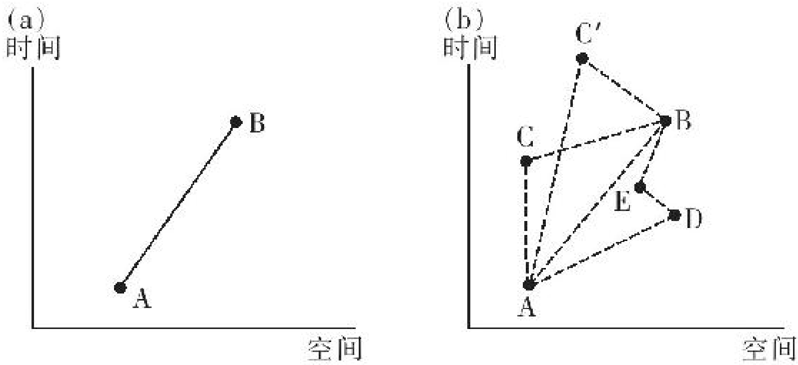


图57　电子自时空图中的一点至另一点的振幅称为“E（A至B）”，虽然我把E（A至B）表示为两点间的直线（a），但我们可以把它想象为许多振幅之和（b），这些振幅包括电子在“两步”路径中于C或C′改变方向的振幅，在“三步”路径中于D和E改变方向的振幅——此外还有自A直达B的振幅。电子可在任意处改变方向，改变次数可以从零至无穷多。电子在从时空图上A至B的途中改变方向的转折点可以多到无限，所有这些全包含在E（A至B）的公式中。

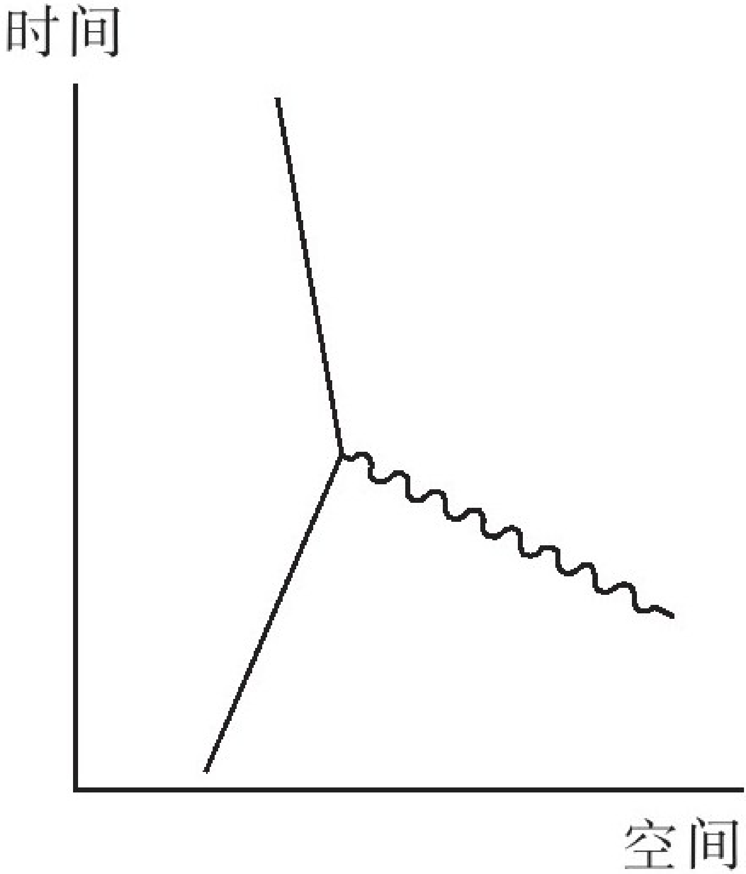


图58　电子（用直线表示）以一定的振幅发射或吸收光子（用波纹线表示），因为发射或吸收的振幅是一样的，我把两者都称为“耦合”。耦合的振幅是一个数，我称之为j；对电子来说它大约等于-0.1（这个数有时也叫做“电荷”）。

这事件可能以另一种方式发生，即位于1的电子走到4，位于2的电子走到3——同样，这也是两个相伴发生的子事件，这“第二方式箭头”是E（1至4）×E（2至3），我们把它和“第一方式”箭头加起来。⑤

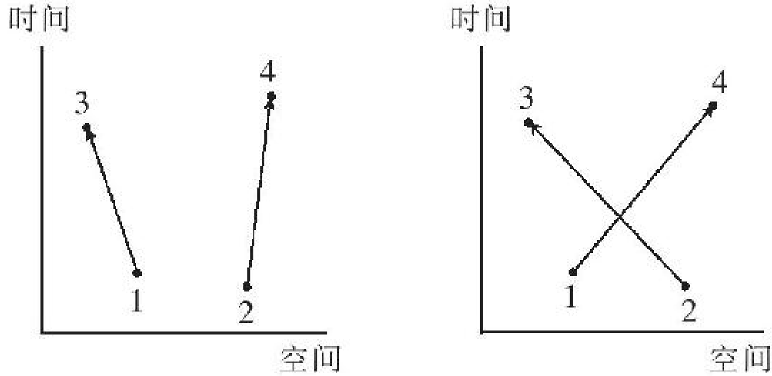


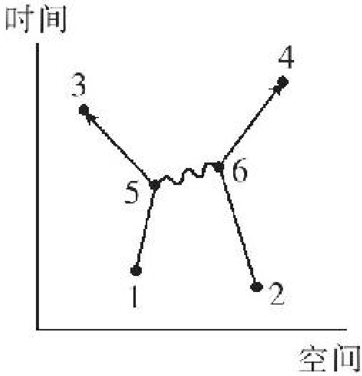
图59　为了计算位于时空图上1、2两点的电子终止于3、4两点的概率，我们用E（A至B）的公式先计算1至3和2至4这“第一种方式”的箭头；然后计算1至4和2至3（交叉路径）的这“第二种方式”的箭头。最后我们将“第一方式箭头”和“第二方式箭头”相加得到最终箭头的一个很好的近似。（对于虚构的简化的“零自旋”电子，上述作法是对的。如果把电子的极化考虑进去，那应将两个箭头相减——而不是相加。）

这对此事件的振幅是个很好的近似。如果要作更精确的计算以便更符合实验结果，我们必须考虑这个事件发生的其他可能的方式。例如，在这两种主要方式中，每一种都可能出现这样的情况，即一个电子可能突然冲到一旁一个新的好地方，并在那里发射出一个光子（见图60），这期间另一个电子可能跑到另一个新地方并吸收了这个新光子。计算这些新方式中的第一种方式的振幅涉及到如下几个量相乘：电子从1到那个新的地方5（它在那里发射一个光子），然后从5到3；另一个电子从2到另一个地方6（它在那里吸收了那个光子），然后从6到4。我们一定别忘记还要包括光子从5到6的振幅。我准备用高级的数学形式写出事件以这种方式发生的振幅，而你们可以跟着来，这就是

E（1至5）×j×E（5至3）×E（2至6）×j×E（6至4）×P（5至6）

——这其中包括了很多缩短和旋转。（我想请你们写出另一种情况的符号，即位于1的电子终止于4，位于2的电子终止于3。）⑥

但是，且慢！位置5和6可以位于时空图上任何地方——是的，任何地方！这样，所有它们可能位于的那些地方的箭头都必须计算出来并加在一起。你们看，这工作量就大起来了。规则倒不是很难，这就像下棋一样：规则简单，但你要再三再四不断地应用它们。所以计算的困难是在于不得不把许许多多的箭头弄在一起，这就是研究生为什么一定要用四年的时间来学习如何有效率地做这个相加的工作——而我们现在正在讨论的则是一个容易的问题。（当问题变得太复杂时，就要使用电脑！）



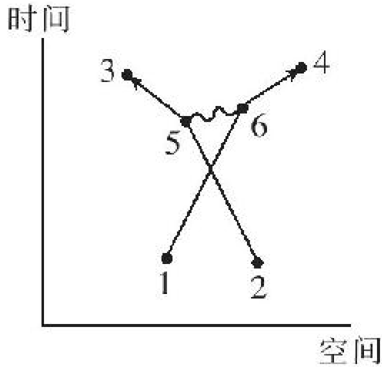


图60　图59中的事件可以两种“其他方式”发生：每种情况都有一个光子在5发射出来，在6被吸收。这两种情况的最终状态与图59的情况一样，两个电子进去，两个电子出来，结果不可区分。所以，要想求得此事件最终箭头的较好的近似，这些“其他方式”的箭头必须加到图59的箭头上去。此为电子书

关于光子被发射和吸收，我想指出：如果点6晚于点5，我们可以说光子在点5处发射出，在点6处被吸收（见图61）；如果点6早于点5，我们大概宁愿说，光子在点6处发射出，在点5处被吸收。其实，我们也完全可以同样地说，光子在时间上是倒行的！不管怎么说，我们都不必担心光子在时空图中走的是哪条路，所有的路都包含在P（5至6）的公式中了，我们说光子是“被交换了”，大自然是多么简单啊！这不美吗！⑦

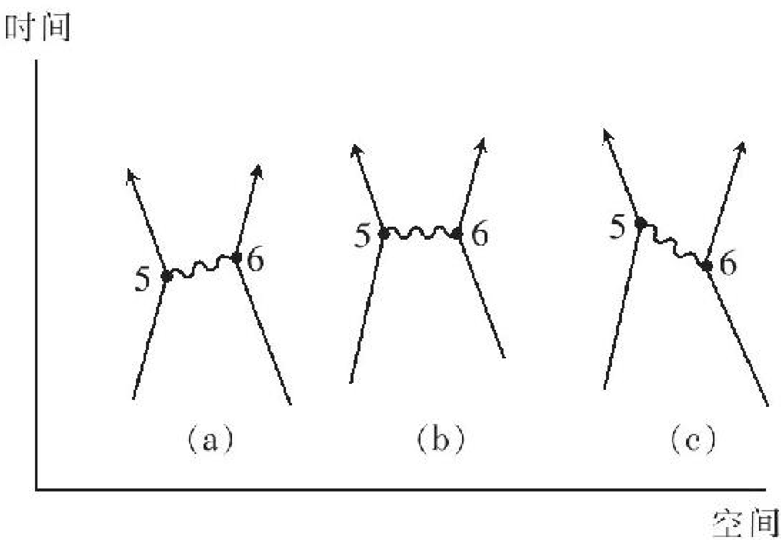


图61　由于光以快于或慢于寻常光速的速度运动的情况都有振幅，上述这三个例子中的光子都可以被认为是从点5被发射出，而在点6被吸收，即使是在例（b）中，光子的发射和吸收是在同一时间发生的，在例

（c）中的光子是发射晚于吸收（例c这种情况，你可能更愿意说光子是被6发射而被5吸收，不然的话，光就非要在时间中倒行不可了！）。就计算（和自然界）而言，这些情况都一样（它们也都是可能的），所以我们只是说一个光子“被交换”，并把在时空图上的位置代入公式P（A至B）中。

现在请看，除了5与6两点之间交换的光子之外，7和8两点之间也可能交换另一个光子（见图62）。我真是懒得把所有基本作用（其箭头须乘起来）都写下来，但是，你们可能注意到了——有一条直线，就有一个E（A至B）；有一条波纹线，就有一个P（A至B）；有一个耦合，就有一个j。这样，对每一组可能的5、6、7和8就有六个E（A至B），两个P（A至B），和四个j。这就造成了亿万个小箭头，必须把它们乘起来，然后再加在一起！

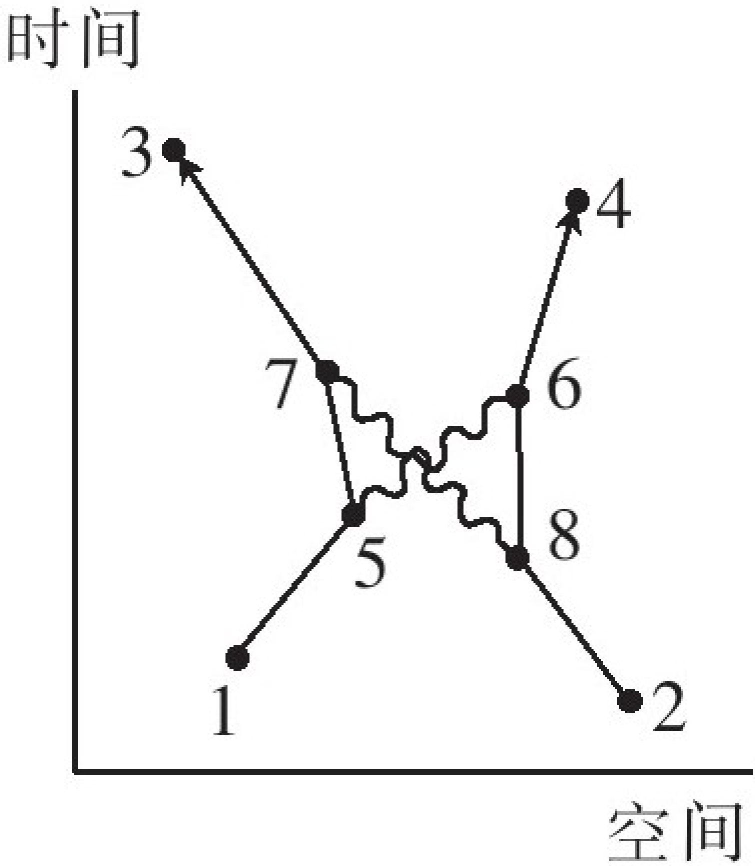


图62　图59中的事件还可能以其他方式发生，这就是可能有两个光子被交换，此方式的作图可有许多种（以后我们会看得更细致），这儿所显示的就是其中一种。它的箭头包含所有可能的中间点5、6、7和8，计算

起来很困难。因为j小于0.1，与图59所示的“第一种方式”和“第二种方式”（它们不含j）相比，一般来说，这个长度要小于万分之一（因为计算要含四个耦合）。

看起来，计算这么一个简单事件的振幅都是件无望的事情，但如果你是个研究生，非得要学位不可，你就必须不断做下去。

但是成功的希望还是有的，这就在于那个魔数j。这个事件的前两种可能发生的方式，计算中没有j；下一种方式有j×j。我们讲的最后一种方式是j×j×j×j。由于j×j小于0.01，这就意味着这种方式的箭头比前两种方式箭头的1%还要小，而同j×j×j×j相应的箭头则比没有j的箭头的1%的1%（即万分之一）还要小。如果你有足够的时间用在电脑上，你可以把概率算得包含j^6——百万分之一，所得的概率可同实验的精确度相配。简单事件就是这样计算出来的。这就是工作的方法，而且全部工作方法就这些，没别的了。

现在让我们看看另一个事件。我们从一个光子和一个电子开始，再终止于一个光子和一个电子。这个事件可能发生的一种方式是：一个光子被一个电子吸收，这个电子又继续前进一点，然后新的光子跑了出来。这个过程叫光的散射（scattering of light）。在对散射问题做图和计算时，我们必须包括几个特殊的可能性（见图63）。例如，电子在吸收一个光子之前可能先放出一个光子（见b），甚至更奇怪的是另一种可能性，即电子发射出一个光子，然后在时间上倒退回去，去吸收一个光子，然后过程再沿时间向前发展（见c）。这类“倒行”电子的路径在实验室的实际物理实验中能够看到，确实是真的。它的行为已包含在这些图和关于E（A至B）的公式中。

从时间向前进的角度来看，向后倒行的电子和普通电子是一样的，只不过它要被正常的电子所吸引——我们说它带正电荷。（如果把极化效应考虑在内，就可以明显看出倒行电子的j的符号为什么反过来，正是这点使得电荷为正。）为此，我们把它称为正电子，正电子是电子的姐妹粒子，它是“反粒子”（anti-particle）的一个例子。⑧

这个现象是普遍的。自然界中每种粒子都有时间倒行的振幅，所以每种粒子都存在着反粒子。粒子和它的反粒子相撞时，它们相互湮灭并形成其他粒子。（正电子和电子湮灭时，通常形成一个或两个光子。）那么光子怎么样呢？光子在时间中倒行时，在所有各方面都显得完全一样（正如以前看到的那样），所以它们是自己的反粒子。瞧！我们把规则的例外情况处理得多么漂亮！

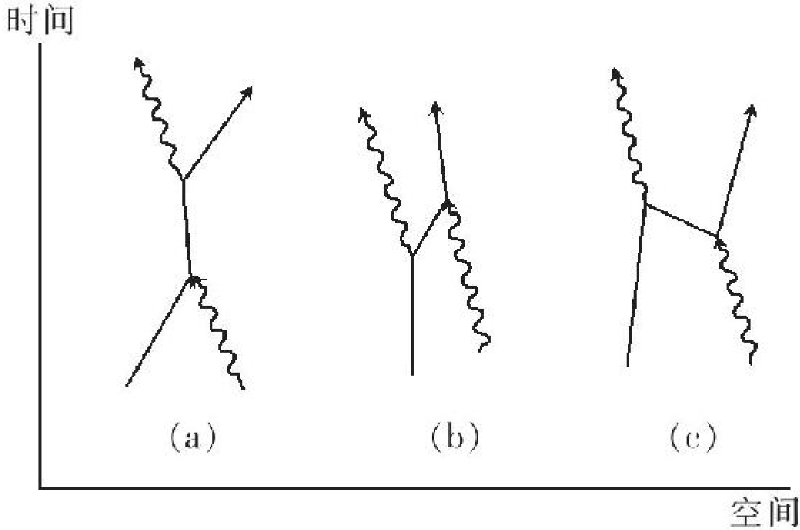


图63　光的散射须包括一个光子进人一个电子和一个光子从电子中出来——顺序不一定如此，如例（b）所示。例（c）所示的是一种奇怪而真实的可能性：电子发射一个光子，再沿时间倒行回来吸收一个光子，然后沿着时间向前进。

我现在想给你们讲讲，当我们沿时间向前时，在时间上倒行的电子在我们看起来是怎样的。我们用一组平行线来帮助眼睛，这组平行线将图形分割为时间区域，T_0至T_{10}（见图64）。我们从T_0开始，这时，一个电子移向一个光子，而这个光子的运动方向则正相反。突然，在T_3处，这个光子变为两个粒子——一个正电子和一个电子。正电子存在的时间不长，它很快就奔向原来那个电子，在时间T_5，它们湮灭并产生一个新的光子。在这段时间，初始光子在不久前造出来的那个电子在时空图中继续前进。

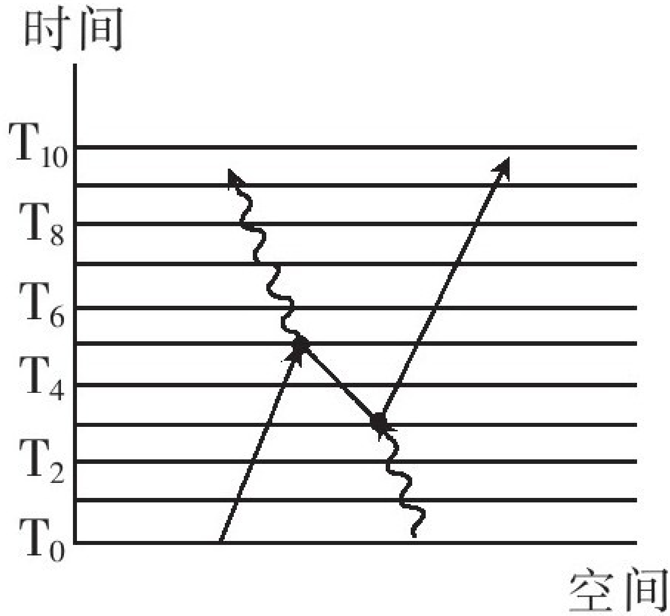


图64　仅以活动都是沿时间的前进方向（因为在实验室里我们非这样做不可）来看图63中的例（c），从T_0到T_3，我们看到一个电子和一个光子相向运动，突然在T_3，这个光子"分裂"，出现两个新粒子——一个电子和一种新粒子（叫做正电子，是时间上倒行的电子）。这个新粒子显然朝初始电子移动。在T_5，正电子与初始的电子湮灭，产生一个新光子。在此期间，初始的光子创造的那个电子在时空图中继续前进。这一系列的事件均可在实验室观察到，并自动地包含在E（A至B）的公式中，而无需任何修正。

下一个我准备讨论的问题是原子中的电子。为了理解原子中电子的行为，我们不得不把原子中另外一部分加上，这就是原子核——位于原子中心的很重的部分，它包括至少一个质子（一个质子就是一个"潘朵拉的盒子"【Pandora's　Box，意即麻烦的根源——译注】，下一讲时，我们将打开这个盒子）。这一讲里，我不讲关于核的行为的正确规律，它们非常复杂。但是，在核静止不动的这种情况下，我们可以近似地把它的行为看作是一个粒子在时空图上从一点到另一点的振幅按E（A至B）的公式计算的粒子，只是n值要高得多。因为与电子比起来核要重得多，我们这里可以对它作近似处理，即认为随着时间的前进，它在空间中实际上停在原处不动。

最简单的原子叫氢，它有一个质子和一个电子。靠着交换光子，质子一直把电子束缚在自己周围，让它绕着自己跳舞（见图65），⑨包含一个以上质子和相应数量电子的原子也散射光（空气中的原子就散射太阳光并使天空呈蓝色），但这些原子的示意图里包含的直线和波纹线太多，以至完全乱作一团。

现在我给你们看看氢原子中的电子散射光的图（见图66）。当电子同核交换光子时，一个光子从原子外面进来，打到电子上并被电子吸收，然后放出一个新的光子。（同以往一样，也有其他可能性要考虑，比如在老光子被吸收之前，新光子就释放出来了。）电子能够散射一个光子的所有路径的总振幅可以总和为单独一个箭头，即一定量的缩短和旋转。（我们以后将把这箭头称为“S”。）这个缩短和旋转的量取决于核以及电子在原子中的布局，不同的物质这个量是不同的。

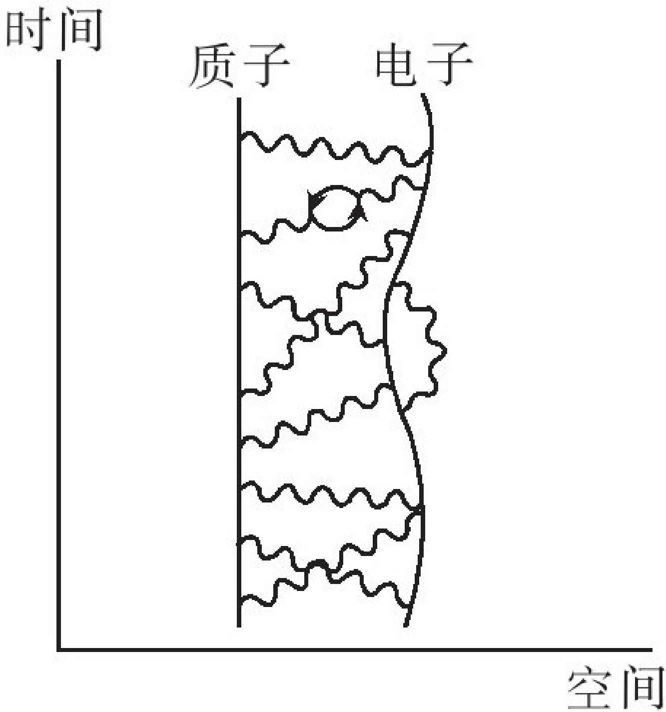


图65　电子通过与质子（一个“潘朵拉的盒子”，第四讲将仔细讨论）交换光子而被束缚在原子核附近的一定范围内。而现在可以把质子近似地看成是一个静止的粒子。这里画的是氢原子，它由一个质子和一个与之交换光子的电子组成。

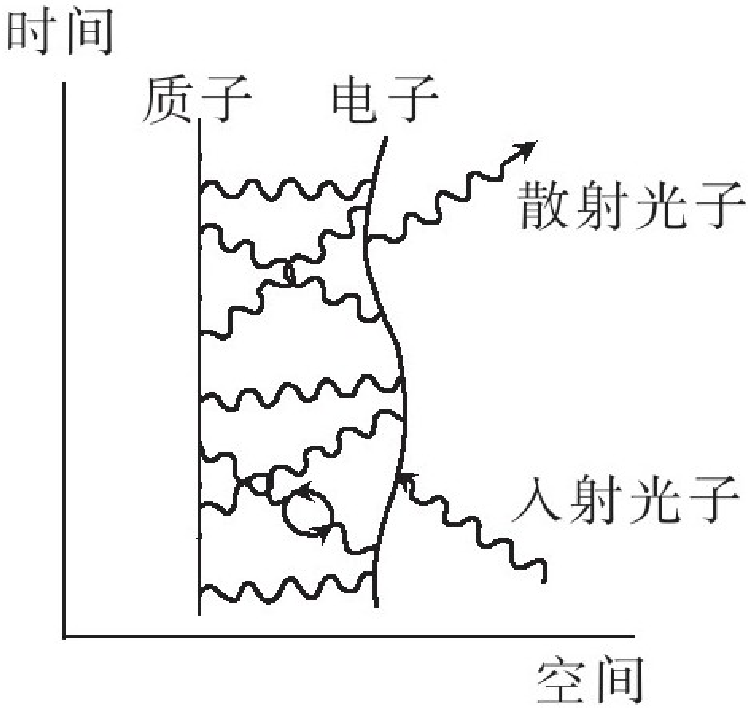


图66　光被原子中的电子所散射，这是玻璃部分反射的原因，此图是这个事件在氢原子中发生的一种可能的方式。

现在，让我们再次看看光被一片玻璃部分反射的情况。这个反射是怎样进行的呢？我曾经讲过光是从前表面和后表面反射的。表面反射这个概念是我做的简化，为的是使讲座开头时容易些。光实际上不是被表面反射的。一个入射光子被玻璃里的原子中的电子所散射，然后一个新光子返上去到达探测器。有趣的是，我们无需把玻璃里面所有电子的亿万个小箭头（每个箭头代表该电子散射一个入射光子的振幅）通通加起来。我们可以只把“前表面”和“后表面”的反射的两个箭头加起来，所得的结果是一样的。让我们看看这是为什么。

为了从新的观点来讨论一个薄层反射的问题，我们必须考虑时间这一维。前面，我们在讲到单色光源发出的光时，我们用了一个想象的记秒表对光子的运动记时——这个记秒表的指针给出某一指定路径的振幅的角度，在公式P（A至B）——这是光子从一处至另一处的振幅——中，没有涉及旋转。记秒表怎么了？为什么不转了？

在第一讲里我只谈到了光源是单色的情况，为了正确分析一个薄层的部分反射，我们需要对单色光源了解得更多一些。一般说来，光子被光源发射出来这个事件的振幅是随时间变化的：当时间前进时，一个光

子为光源所发射的振幅的角度将改变。白光（多种色光混合在一起）光源以混乱的方式发射光子，就是说振幅的角度一阵阵突然而且无规则地变化。但是，在我们建造一个单色光源时，实际上在制作一个已精心安排好的装置，它使得某一时刻一个光子被发射出来的振幅很容易计算出来：这个振幅象记秒表针一样以恒定速度改变角度。（实际上，这个箭头以同我们以前采用的想象中的记秒表同样的速度旋转，只是方向相反——见图67。）旋转的速率取决于光的颜色：对蓝光源来说，振幅的转速是红光源的两倍，这同我们前面所讲的一样。这样，我们用作“想象中的记秒表”的记时器就是单色光源——事实上，一个给定路径的振幅的角度取决于光子何时从光源发射出来。

光子一旦发射出来，它在从时空图的一点到另一点的过程中箭头就不再转了。虽然公式P（A至B）告诉我们光以不同于c的速度从一点到另一点的振幅并不是零，但在我们的实验中，光源到探测器的距离相当大（同一个原子相比），在相互抵销之后，对P（A至B）的长度真有贡献的就只有速度c了。

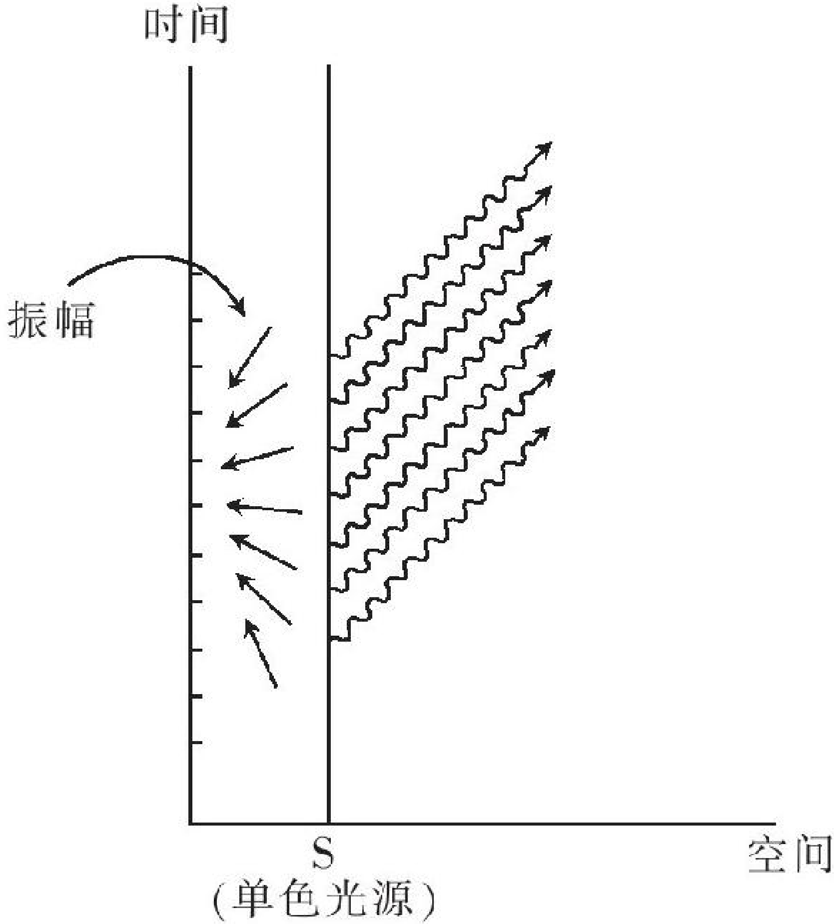


图67　一个单色光源是一架构造得极美的装置，它能够以可预测得相当好的方式发射光子：光子在某时刻被发射出来，这个事件的振幅随时间的前进而以逆时针方向转动，这样，该光源在稍晚时刻发射光子的振幅，其角度要稍小一点。这里假设从光源中发射出来的光子，都以速度c运动（因为距离相当大）。

在开始对部分反射做新的计算之前，我们先对A处的探测器在某一时刻的一声作响给个完整的定义。我们把玻璃分成若干薄层——例如分成六层吧（见图68a）。在第二讲我们得知几乎所有的光都是从玻璃的中央反射的，从这个分析可以知道虽然每个电子都向所有的方向散射光，但当把每一层的所有箭头都加起来以后，唯一没有抵销掉的地方就是光向下直射到这些层的中间部位的地方，光在这里可沿两个方向散射——直返上去到探测器，或直接下来通过玻璃。将代表竖直通过玻璃的六个中心点（X_1至X_6）的光散射的箭头都加起来就确定了这个事件的最终箭头。

好！现在我们就来计算光经过X_1至X_6可能走的每一条路径的箭头。每一条路径都涉及四步（这意味着有四个箭头要相乘）：

——第一步：一个光子在某一时刻被光源发射出来。

——第二步：该光子从光源到达玻璃里这六个点中的一点。

——第三步：该光子被该点的一个电子所散射。

——第四步：一个新光子寻路上来到达探测器。

我们会说第二步和第四步（一个光子走向或离开玻璃的某一点）的振幅没有缩短或旋转，因为我们可以假设在光源和玻璃之间或玻璃和探测器之间没有光损失掉或分散开。对于第三步（一个电子散射一个光子），散射的振幅是个常数——即缩短和旋转某一定量S——而且在玻璃中各处都是一样的。（我以前提到过这个量随物质的不同而不同。对玻璃来说，S的旋转为90°。）这样看来，在需要相乘的四个箭头中，只有第一步的箭头（即光子在某一时刻被光源发射出来的振幅），对不同的光子来说是不同的。

必须在时刻T到达探测器A的诸光子，它们被发射出来的时间（见图68b），对六个不同的路径不是一样的。在X_2处散射的光子被发射出来的时间要比在X_1处散射的光子被发射出来的稍微早一点，测器奔去，并在时刻T到达（以向左上方倾斜的波纹线标出）。对这六个可能途径而言，它们的2、3、4步的振幅是相同的，只是第一步的振幅不同：与被玻璃表层的电子（位于X_1）散射的光子相比，被较深的第二层散射出来的光子必须于早些时候（T_2）离开光源。将每一种可能路径的四箭头乘起来，得出的箭头（如（c）所示）短于（b）中所示的箭头，而且都转了90°（这同玻璃中电子的散射特性相一致）。将这六个箭头按顺序相加，它们组成一个弧形，最终箭头是它的弦。用另一种方法同样可以得出这个最终箭头，如（d）所示，画两个半径箭头，令它们相减（即把“前表面”的箭头转到相反方向，并将它同“后表面”箭头相加），这就是我们在第一讲中采取的捷径。

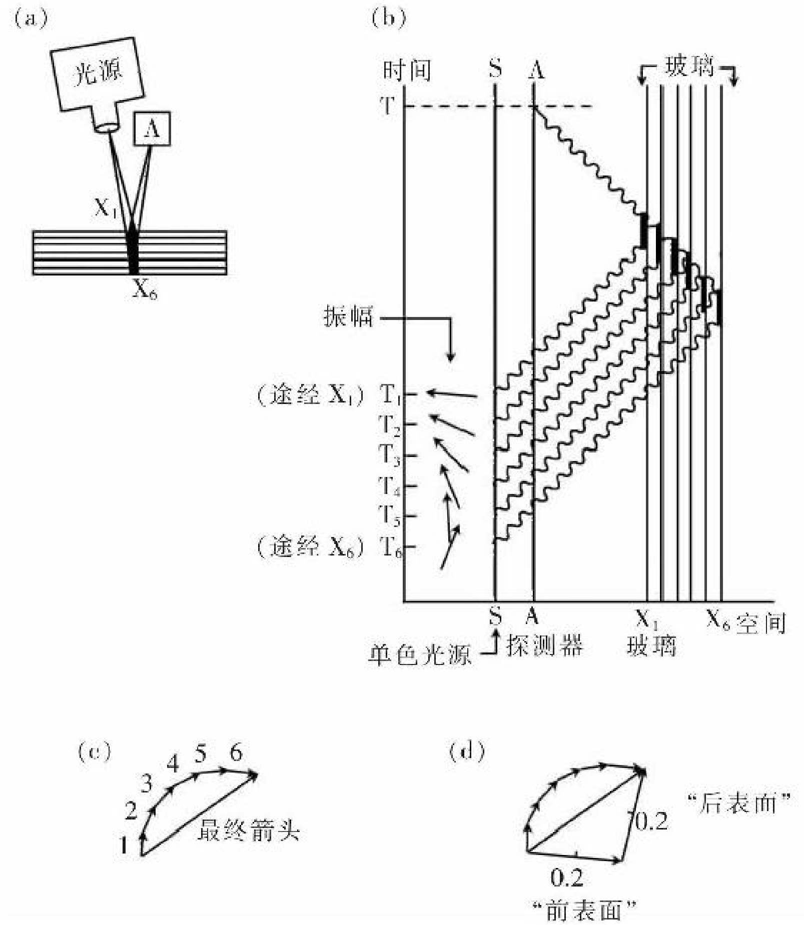


图68　我们对部分反射作个新的分析，先将这片玻璃分为若干薄层（这里是六层），然后看光从光源到玻璃再返上去到达A处探测器的各种方式。玻璃中最重要的几个点是每层中央的点（这里光散射的振幅不被抵销掉）。（a）中示出X_1至X_6在玻璃中的实际位置；（b）则示出它们在时空图竖直线上的位置。我们要计算的是在某时刻T, A处的探测器作响这事件的可能性。就是说，这个事件就是时空图上的一点（A与T的相交处）。对于这个事件发生的每一条可能途径，都一定按顺序先后走四步，所以这四个箭头应该相乘。这四步在（b）中示出：1）一个光子在某一时刻离开光源（T_1至T_6的箭头代表此事件在这六个不同时刻的振幅）；2）光子从光源到这六个点中的一点（六者在图中以向右上方倾斜的六条波纹线示出）；3）位于这六点中一点的电子散射一个光子（以短粗的纵线标出）；4）一个新光子向探

因为经过X_2的路径稍长一些。这样，T_2处的箭头要比T_1处的箭头旋转得多一点，因为单色光源在某一时刻发射出一个光子的振幅随发射时间的前进而以逆时针方向旋转。同样的道理适用于从T_1直到T_6的所有箭头：这六个箭头的长度全都一样，但它们旋转到不同的角度，就是说，

它们指向不同的方向，因为它们代表光源在不同时间发出的光子。

在将T_1处的箭头按照第二、三、四步指示的量缩短，并按第三步所指示的旋转90°以后，我们得到箭头1（见图68c）。用同样的方法我们得到箭头2-6。这样，箭头1-6的长度都相同（经缩短后），而且旋转后六个箭头相互间的角度与在T_1至T_6六个时刻这几个箭头相互间的角度完全相同。

下面我们要将箭头1至6加起来。将这些箭头从1至6按顺序联结起来，我们就得到一个类似弧形或半圆的图形。最终箭头是这个弧的弦。最终箭头的长度随玻璃厚度的增加而增加——较厚的玻璃意味着可分为较多的薄层、有较多的箭头，从而弧在圆上占更大的部分——直到弧达到半圆那样大（即最终箭头是该圆的直径）。然后，最终箭头的长度就随玻璃厚度继续增加而变短，当完成一个圆后又开始一个新的圆。这个长度的平方就是这个事件的概率，它以零至16%的循环周而复始地变化。

数学上有个窍门，我们可以用它来得到同样的答案（见图68d）：如果从这个“圆”的中心到箭头1之尾和箭头6之头分别画两个箭头，我们会得到两个半径。如果将从圆心到箭头1的半径箭头旋转180°即被“减去”，那么将它同另外那个半径箭头合成，就会得到同样的最终箭头！这就是我在第一讲中所做的：这两个半径就是我所说的分别代表“前表面”反射和“后表面”反射的两个箭头。它们的长度均为那个著名的0.2。⑩

这样，通过不真实地想象所有的反射都仅来自前后两个表面，我们就可以得到关于部分反射概率的正确答案，在这个依直觉所做的简单分析中，“前表面”与“后表面”箭头是能够给我们正确答案的数学上的作图法；而我们刚才用时空图和组成部分圆的箭头所作的分析才是比较准确地代表真实发生的情况：部分反射是玻璃内部的电子对光的散射。

现在我们来看，通过了这片玻璃的光又怎样了呢？首先，有一个振幅是相应于光子直线通过玻璃，没有碰上任何电子（见图69a）。按长度来说，这个箭头是最重要的。但是，光子还有六个其他途径能够到达玻璃下面的探测器：光子可能到达X_1并散射出一个新光子落到B上；光子也可能到达X_2，散射出新光子落到B上，等等。这六个箭头的长度都与前面那个例子中组成“圆”的那些箭头长度一样，因为它们的长度都是基于玻璃内一个电子散射一个光子的相同振幅S。但这次所有这六个箭头都指向同一方向，因为都只有一次散射的这六条路径的长度是相同的。这些小箭头的方向同透明物质（如玻璃）的主箭头成直角。这些小箭头与主箭头相加，结果使得最终箭头的长度与主箭头一样，但稍稍偏转了一点方向。玻璃越厚，小箭头越多，最终箭头偏转得越多。这就是聚焦透镜真正的工作方式：厚度较大的玻璃嵌入较短的路径中，使得所有路径的最终箭头能够指向同一方向。

如果光子在玻璃中比在空气中行进得慢，也会出现同样的效应，因为最终箭头要旋转得多些。这就是为什么我早些时候说看来光在玻璃（或水）中行进得比在空气中要慢一些。实际上，光行进得“慢些”是玻璃（或水）中的原子散射光引起的额外旋转造成的。光在通过给定物质时最终箭头额外旋转的程度称为该物质的“折射率”（index of refraction）。[11]

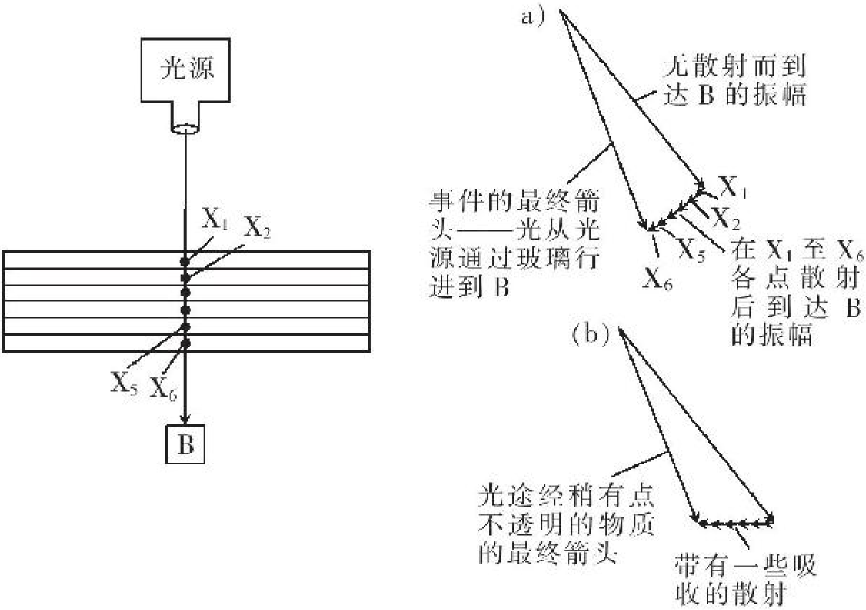


图69　光不为玻璃中的电子所散射而直接通过玻璃的振幅是光从这层玻璃透射出来到达探测器B的最大振幅（如（a）所示）。将它与代表光从这六层中每一层（以点x_1至x_6为代表）散射的六个小箭头相加。这六个小箭头长度相同（因为玻璃中各处的散射振幅都是相同的），并指向同一方向（因为从光源途经六点中任意一点再到B长度都是一样的）。将这六个小箭头同那个大箭头相加以后，我们发现光从一片玻璃透射出来的最终箭头，比起“光通过玻璃（无散射地）直接出来”的箭头，要偏转得多一些。因此在我们看起来，光通过玻璃比通过真空和空气要用更多的时间。由于物质中的电子而导致最终箭头的额外偏转量就叫做“折射率”。对于透明体，这些小箭头同主箭头成直角（如果我们将双散射、三散射考虑在内的话，这些小箭头实际上是向内弯进来的，以确保最终箭头不会长于主箭头：自然界永远设法做到这一点，所以投进来的光是多少，我们就得到多少，永远不能多得一点）。对于半透明物质（它们吸收一部分光），小箭头指向主箭头，这就使得最终箭头比主箭头小得多（如（b）所示），这较短的最终箭头就代表一个光子透射通过半透明体的已变小的概率。

对于吸收光的物质来说，小箭头与主箭头之间夹角小于直角（见图69b）。这就使得最终箭头比主箭头短，这意味着光子通过半透明玻璃

比通过透明玻璃的可能性要小。

这样，前两讲中提到的所有现象和任何一个数字，诸如部分反射的振幅为0.2，光在水和玻璃中的“变慢”等等，用这三种基本作用都可以解释得更为详尽——事实上，这三种作用确实也解释了几乎所有其他现象。

大自然千变万化的现象几乎全都是这三种基本作用千篇一律的不断组合的结果，这真让人难以置信。但事实确实如此。下面我概略地讲一点这种“千篇一律”怎样导致“千变万化”。

我们可以从光子讲起（见图70）。在时空图上位于1、2两点的两个光子到达位于3、4两点的探测器的概率是多少？这个事件可以两种主要方式发生，每一种方式都取决于相伴发生的两件事：光子可以直达，即P（1至3）×P（2至4），也可以交叉进行，即P（1至4）×P（2至3），这两种可能性的结果振幅相加，就有了干涉（正如我们在第二讲中看到的）。这个干涉使得最终箭头的长度发生变化，变化的大小取决于所取各点在时空图中的相对位置。

如果我们使点3和点4位于时空图中同一点，情况会怎么样呢（见图71）？比如说，这两个光子都终止于点3，让我们看看这对事件的概率会有什么样的影响。现在我们有P（1至3）×P（2至3）和P（2至3）×P（1至3），这是两个全同箭头。相加时，两箭头之和的长度是每个箭头的两倍，而最终箭头的平方是每单独一个箭头的平方的四倍，因为这两个箭头是全同的，它们永远是“成直线排列”。换句话说，干涉不会由于点1和点2之间的相对间隔而起伏；它永远是相长干涉。如果没想到这两光子永远是相长干涉这一点，我们就会以为应该得到（平均说来是）两倍的概率。可我们得到的总是四倍的概率。当光子相当多时，这种多于预期的概率甚至还要增加。

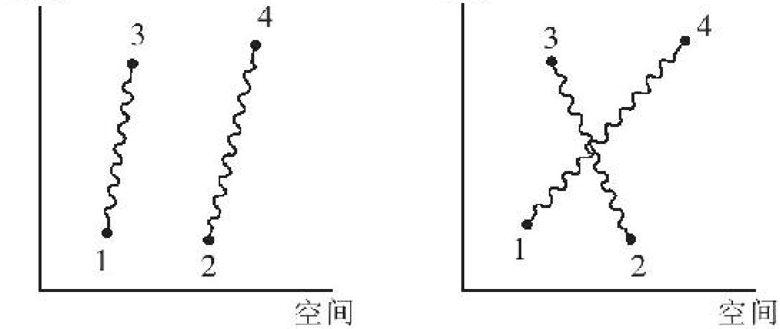


图70　位于时空图上点1和点2的光子到达点3和点4的振幅可近似地考虑为由两种主要的方式组成：P（1至3）×P（2至4）和P（1至4）×P（2至3）（如图所示）。随着点1、2、3、4的相对位置不同，干涉程度也

不同。

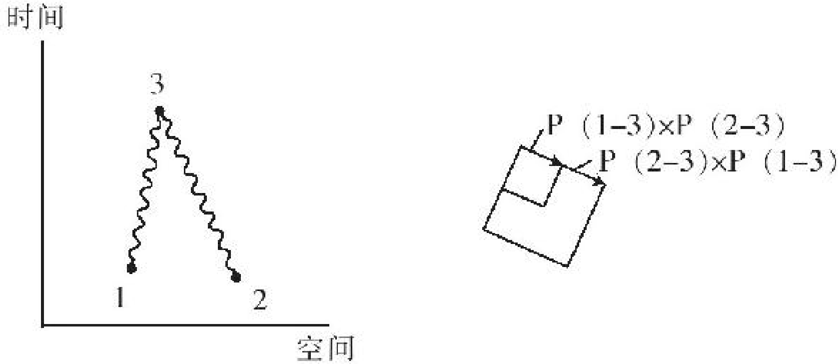


图71　如果点4和点3重叠在一起，那么P（1至3）×P（2至3）同P（2至3）×P（1至3）这两个箭头在长度和方向上完全一样。相加时这两个箭头总是成直线排列，构成其中任一箭头的两倍，而最终箭头的平方则是其中任一箭头平方的四倍。所以，光子倾向于奔向时空图中的同一点。光子越多，这个效应越大，这就是激光作用的基本原理。

这会导致若干实际的效应。我们可以说光子倾向于进入同一条件，或者说同一“状态”（指在空间不同点发现一个光子的振幅不同的情形）。如果有几个光子已经处于某一状态（只要原子能够发射这个状态的光子），那么原子发射处于这个状态光子的机会就会增加。这个“受激发射”（stimulated emission）的现象是爱因斯坦发现的，当时他正在由于提出光的量子模型而创立量子理论。激光的工作就是基于这个现象。

如果我们拿虚构的、自旋为零的电子同光子作比较，那么电子也会发生同样的事情。但是，在真实世界里电子是极化的，所以，事情就大不一样了：E（1至3）×E（2至4）和E（1至4）×E（2至3）这两个箭头相减，就是说在相加之前，这两个箭头中要有一个旋转180°。当点3和点4是同一点时，这两个箭头长度和方向都相同，所以相减时它们就抵销了（见图72）。这意味着电子和光子不同，它们不喜欢走到同一点去；它们之间像躲避瘟疫一样互相躲着——没有两个极化相同的电子能够处于时空图的同一个点上——这就是所谓的“不相容原理”（exclusion principle）。

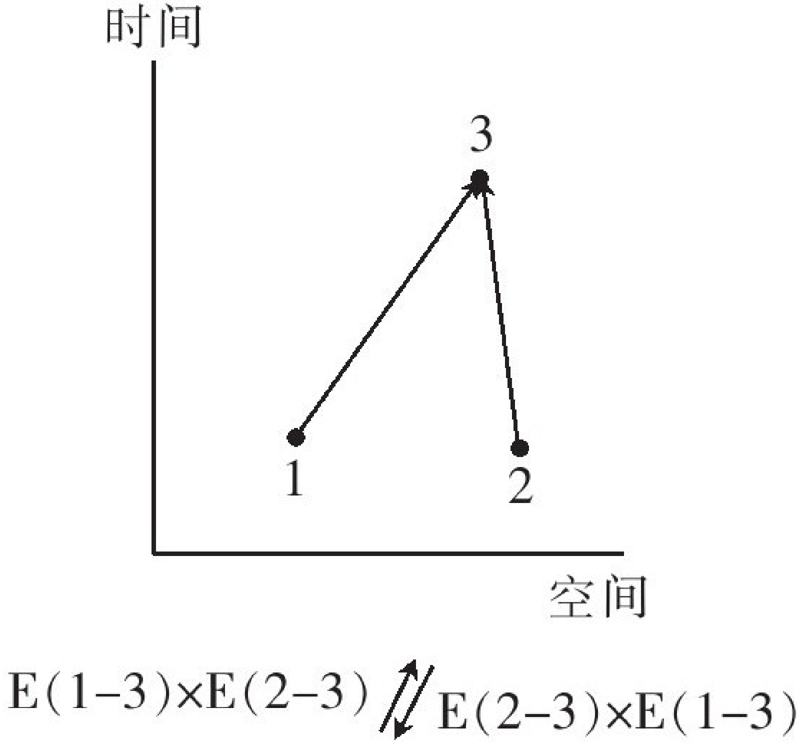


图72　如果两个电子（极化相同）试图达到时空图上的同一点，那末由于极化效应，干涉永远是相消干涉：两个相同的箭头E（1至3）×E（2至3）和E（2至3）×E（1至3）相减使得最终箭头为零。两个电子讨厌出现在时空图上同一点，这叫做“不相容原理”，它是宇宙间存在大量不同原子的原因。

这个不相容原理原来就是原子具有千千万万种不同化学性质的根由。一个质子同围它跳舞的一个电子交换光子，它就叫做氢原子。两个质子同它周围的两个（极化方向相反的）电子交换光子，它就叫做氦原子。你们看，化学家数数儿的办法真复杂：他们不说“一、二、三、四、五个质子”，偏要说“氢、氦、锂、铍、硼”。

电子只有两种可能的极化方式，这样，在核内有三个质子（可同三个电子交换光子）的原子——锂原子中，第三个电子与另两个电子（这两个电子占满了离核最近的可占位置）相比，离核比较远，与质子交换的光子也比较少，这就使得这个电子很容易在来自其他原子的光子的影响下，逃离自己所属的核。大量这种原子凑在一起，就很容易失去它们各自的第三个电子，从而组成一个在原子与原子之间到处游泳的电子海。对任何一点小的电力（光子），这个电子海都会有反应，从而形成电流——我现在讲的是锂金属的导电性。氢和氦原子不会将自己的电子丢给其他原子，它们是“绝缘体”。

所有各种原子——有一百多种——都是由一定数目的质子（它们与同数量的电子交换光子）组成的。它们聚成原子的形式复杂多样，从而展示出千变万化的各种性质：有些是金属，有些是绝缘体；有些是气体，另一些是晶体；有软东西，有硬东西，有带颜色的东西，也有透明体——简直是形形色色、五花八门，让人目不暇接，所有这些都来源于“不相容原理”和那三个很简单的作用P（A至B），E（A至B）和j的不断重复。（如果这个世界上的电子是非极化的，那么所有的原子都会具有同样的性质：所有电子将群居在一起，紧靠着自己的原子核，它们不会那么容易被其他原子所吸引而发生化学反应。）

你也许会奇怪，这么简单的几个作用怎么会产生如此复杂的世界。这是因为我们在这个世界上所看到的现象是极其大量的光子的交换和干涉错综复杂地交织在一起的结果。知道这三种基本作用仅仅是朝着分析任何一种真实情况迈进的一小步，光子的交换量极大，多到不可胜数——至于哪种可能性比较重要，那就要凭经验了。这样，我们发明了诸如“折射率”、“压缩系数”（compressibility）、“原子价”（valence）等概念，在有大量细节需要考虑时，我们借助这些概念作近似计算，知道这三种基本作用同懂得下棋规则类似——下棋规则是基本而简单的，但要能够下好棋，就要懂得棋盘上每个位置的特点，各种情况的性质，而掌握这些，那可是高深多了，困难多了。

物理学有很多分支，诸如研究为什么铁（有26个质子）是磁性的，而铜（有29个质子）却无磁性，或者为什么一种气体是透明的，而另一种气体却不透明等等，这些分支叫做“固体物理学”，或“液态物理学”，或“实际的物理学（honest physics）”。而发现了这三种简单的小作用（最容易的部分）的分支学科，我们把它叫做“基础物理学”——我们把这个名称偷了来，是为了使其他物理学家感到不舒服！在今天，最令人感兴趣的问题——当然也是最实际的问题——显然是固体物理学中的问题。但是有些人则说再没有什么能比一个好理论更实际的了，而量子电动力学理论就不折不扣地是个好理论。

最后，我想返回来讲一讲1.00115965221这个数，我在第一讲中谈过人们曾仔细地测量和计算它。这个数代表一个电子对外磁场的响应，我们把它称为“磁矩”（magnetic moment）。在狄拉克首先想出规则来计算这个数时，他使用了公式E（A至B）并得出了很简单的答案，我们将把这个答案看作1（在我们的单位体系中）。电子磁矩的一级近似图形是很简单的——一个电子在时空图上从一点移到另一点，并与来自一个磁体的光子相耦合（见图73）。

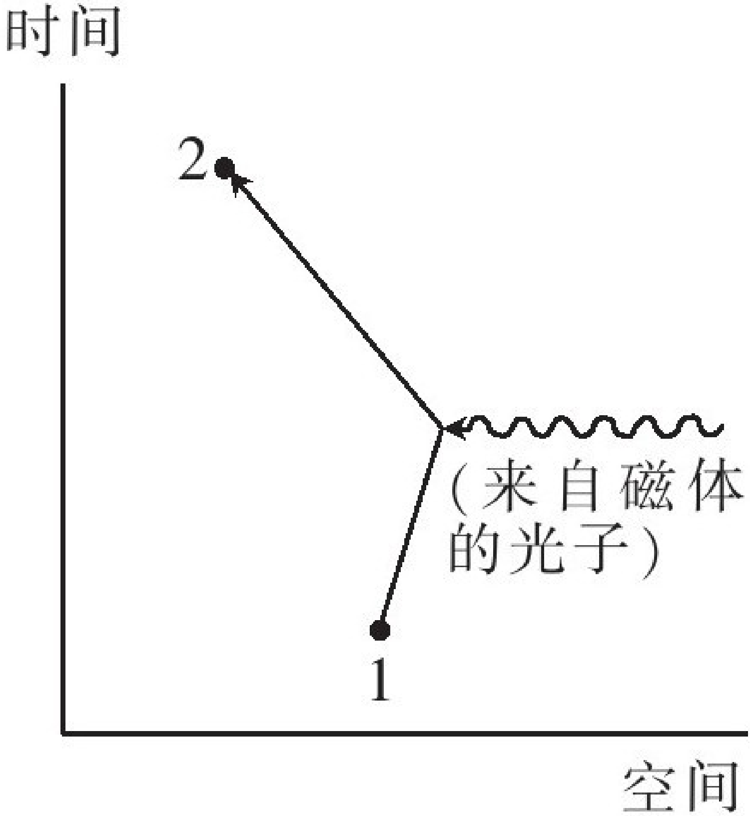


图73　狄拉克计算电子磁矩的图是很简单的。这个图所代表的值将被称为1。

几年以后，人们发现这个值并不精确地为1，而是稍大一点——约为1.00116。这个修正数第一次是1948年由施温格（J.Schwinger）用j×j除以2π得到的，修正的理由是，电子从一点到达另一点还可以有另一条路径，这就是说，电子不是从一点直接到另一点，它也可以向前移动一会，突然放出一个光子，然后（你说可怖吧！）又把自己那个光子吸收回来（见图74）。恐怕这么做有点不那么“道德”，但电子确实就这么干！要计算出这另一条不同路径箭头的大小，我们必须在时空图上凡是光子能够被发射和光子能够被吸收的所有各处全画上箭头。这样，就应有两个额外的E（A至B）、一个P（A至B）和两个额外的j，将所有这些乘起来。研究生要在研究生院的第二学年的初级量子电动力学课上学习如何做这个简单的计算。

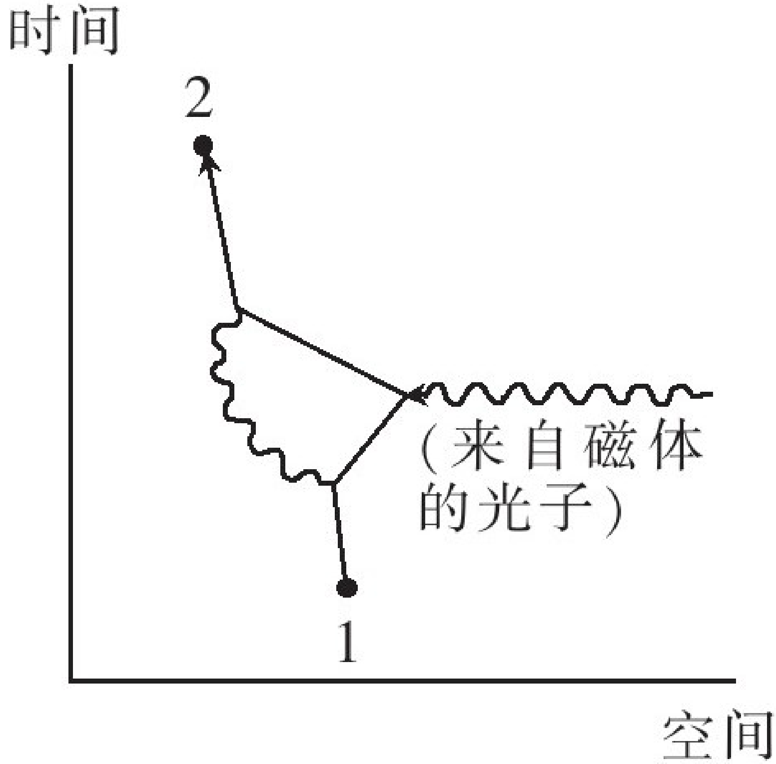


图74　实验室中的实验表明，电子磁矩的实验值不是1，而是比1稍大一点。这是由于还存在其他可能方式。电子可能发射出一个光子，然后再把它吸收——这需要两个额外的E（A至B）、一个P（A至B）和两个额外的j，施温格将这种可能性考虑在内计算出来的修正值是j×j除以2π，因为这种方式从实验上无法同电子原来那种方式（一个电子从点1出发到达点2）分开，所以这两种方式的箭头应相加，于是出现干涉。

但是，且等一下：实验对电子行为的测量已相当精确，以至必须考虑我们的计算中还须计及其他可能性——电子从一处到另一处的所有那些共涉及四个额外耦合（见图75）的可能性。电子发射和吸收两个光子的方式有三个。此外，还有一个新的、有趣的可能性（见图75右端）：一个光子被发射出来，它造成了一个正电子-电子对，然后——再次，如果你还抱着你的“道德上的”异义的话——电子和正电子将湮灭，产生一个新光子，它最终被电子所吸收。这种可能性也必须计算在内！

曾有两组相互“独立”的物理学家，花了两年时间计算这后一项，然后他们又花了一年的时间发现一处错误——实验测定的值与计算值稍稍有些不同，而且有一阵子看来似乎是这个理论第一次同实验结果不符。但是，否！这是个计算上的错误。怎么两个小组会犯同样的错误？原来，在计算接近尾声时，两个小组曾交换过意见，并且抹掉了他们计算

上的差异。这么一来他们就并不是真正独立的了。

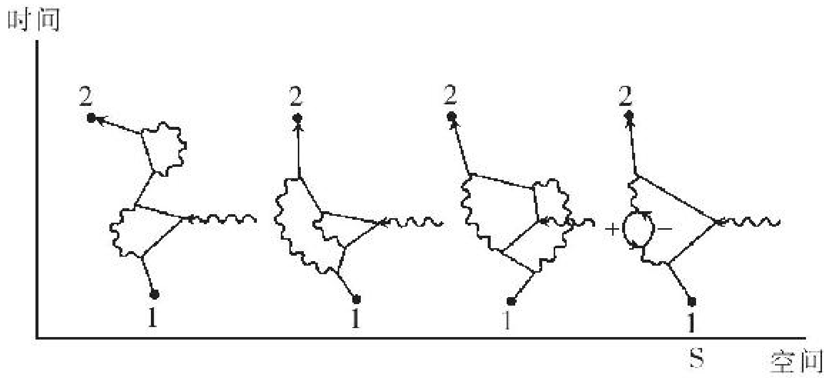


图75　实验室的实验进一步精确，以至我们必须（对时空图上所有可能的中间点）计及含四个额外耦合的那些可能的待选方式。这里示出其中的几个，右端的那个待选的路径包含一个光子分裂为一个正电子-电子对（如图64所示），这个正电子-电子对再湮灭而产生一个新光子，它最终为电子所吸收。

含有六个额外j的项所涉及的事件可能发生的方式甚至更多，现在我画几个给你们看看（见图76）。人们花了二十年的时间才把这个额外的精确值引入电子磁矩的理论值。在这段时间内，实验物理学家又做了更细致的实验，并将实验值的小数点后面又多添了几位——理论仍然同这个值符合得很好。

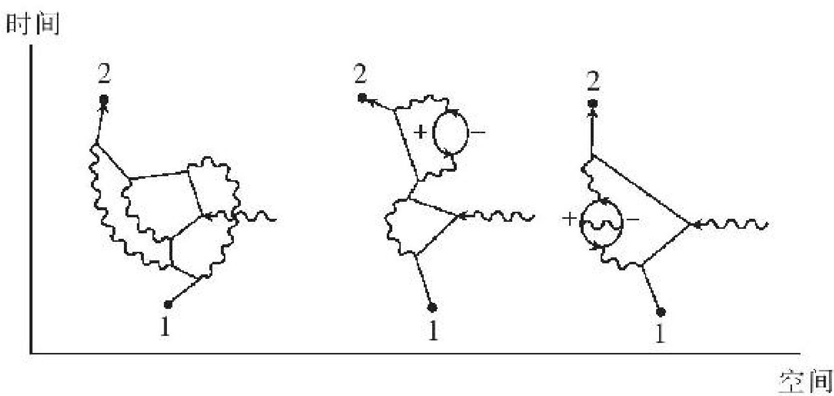


图76　为使理论值更加精确，计算现在还在继续。对振幅作出下一个贡献的是含六个额外耦合的所有可能性，它包括差不多70个图，这里画出其中的三个。到1983年，理论值为1.00115965246，不定度为小数点后最后两位大约20，实验值为1.00115965221，不定度量为小数点后最后一位大约4。这个精确度相当于测量洛杉矶到纽约的距离（超过3000英里）时，误差不超过一根头发的宽度。

这样，为了计算，我们做了些图表，写下数学上它们相当于什么，再把这些振幅加起来——这过程简单易行，就象写“食谱”一样。所以，机器就可以做这件事。现在我们有超级电脑，我们已经开始计算有八个额外j的项。目前的理论值为1.00115965246；实验值为1.00115965221，误差是小数点后最后一位数±4。理论值的不定度（小数点后最后一位大约4），一部分是由于电脑的舍入误差，大部分则是由于我们知道的j值还不十分精确（最后两位数大约20）。有八个额外j值的项涉及到九百个图，每一个都有十万项——计算量大得不可思议。这个计算现在正在进行。

我敢肯定，几年之后，关于电子磁矩的理论值和实验值都会在小数点后再多添几位。当然，我不敢说这两个值是否会更加一致。关于这一点，在人们进行计算并作出实验之前，谁也不可能预料。

现在我们把这个数由浅入深的整整讲了一圈，这个数是我故意选来放在这几讲的开始来“吓唬”你们的。我希望你们现在对这个数的意义的理解要好多了：我们一直在检验奇妙的量子电动力学理论到底有多么正确，而这个数说明它的正确性已达到了多么令人吃惊的程度。

在这个讲座里，我从始至终以愉快的心情告诉你们，得到这样一个精确理论是以违背我们的常识为代价的。我们必须接受一些非常稀奇古怪的行为：概率的增大和减小，光从镜子的所有部分反射，光沿非直线路径前进，光子以快于或慢于寻常的光速运动，电子在时间中倒行，光子突然分裂为一个正电子-电子对，等等。但是，要真正懂得我们在这个世界所看到的几乎所有的现象背后大自然到底在干什么，我们非违背常识不可。

除了极化或偏振的专业细节没讲以外，我已经给你们描述了可以用来理解所有这些现象的框架。我们画出一个事件可能发生的所有路径的振幅，在一般情况下需将概率加起来的地方，我们就将这些振幅相加；在需将概率相乘的地方，我们就将这些振幅相乘。考虑什么问题都借助于振幅，在开始时可能会有点困难，因为它们太抽象了。但是要不了多久，大家就会熟悉这种奇怪的语言。在我们每日看到的大量现象的背后，只有三种基本作用：其中一种用简单的耦合数j来描述；另外两个则用函数P（A至B）和E（A至B）描述，这两者密切相关，这就是它的全部内容。从这里出发，所有其余的物理定律都可以推导出来。

但是，在结束这一讲前，我想再补充讲一点。人们即使不知道有关极化的技术细节，也照样可以理解量子电动力学的精神和特点。但是我敢肯定，如果我不把我省略掉的内容谈上几句，你们大家都会感到不舒服。光子原来有四种不同的形态，叫做四种偏振态，它们在几何上与时空图的四个方向相关。就是说，光子在X、Y、Z和T四个方向上偏振。（恐怕你在什么地方会听说过，光只有两个偏振态，例如一个沿Z方向前进的光子可能在两个同Z成直角的方向上【即X或Y方向】偏振。好，你会猜得出来：在光子以光速前进相当长距离的情况下，Z和T两项的振

幅会完完全全给抵销掉。但是，对于往来于在原子内的质子和电子之间的虚光子来说，T方向恰恰是最重要的。）

同样，一个电子也可处于同这四个方向相应的四种状态之一，不过方式更微妙一点。我们可以把它们称作状态1、2、3、4。计算一个电子从时空图中的点A至点B的振幅也变得多少复杂一点，因为我们现在问的是这样的问题：“一个在点A释放出来的处于状态2的电子到达点B并处于状态3的振幅是多大？”从起始于A处的四种不同状态到终止于B处的四种不同的状态，共有16种可能的组合。这十六种状态以简单的数学方式同我曾讲过的公式E（A至B）相对应。

而对于光子，无需进行这类修正。就是说，在A处沿X方向偏振的光子，在B处也沿X方向偏振，从A至B的振幅为P（A至B）。

极化引起了可能发生的大量不同耦合。比如说，我们可以问：“一个处于状态2的电子吸收一个在X方向偏振的光子，然后变成处于状态3的电子，这个事件的振幅是多大？”并不是极化电子所有可能的组合都伴有与光子的耦合，但那些进行耦合的，就都以相同的振幅j耦合，只是有的时候箭头要再多转几个90°。

各种不同类型的极化的可能性以及耦合的性质，全都可以从量子电动力学和两个进一步的假设以非常优美的形式推导出来。这两个假设是：1）我们实验室中所用的仪器转到任何方向都不影响实验结果；2）实验仪器所在的飞船以任意某个速度运动也都不影响实验结果。（这就是相对性原理。）

这个优美而普遍的分析表明：每个粒子都必须属于这一类或那一类可能的极化或偏振，我们把这不同的类别称为自旋0，自旋1/2，自旋1，自旋3/2，自旋2等等。这些不同的类别行为方式不同。自旋0的粒子是最简单的——它只有一个分量，实际上完全不极化。（我们在这讲中所考虑的虚电子和虚光子就是自旋0的粒子。到目前，自旋0的基本粒子我们还没有发现。）自旋1/2的粒子可以真实电子为例。自旋1的粒子可以真实光子为例。自旋为1/2和1的粒子两者都有四个分量，其他类型的粒子分量更多，例如自旋2的粒子，就有十个分量。

我曾说过，相对性和极化（或偏振）之间的关系是简单优美的，但我不敢说，我能简单而优美地把它们解释清楚！（想解释清楚，我至少要增加一讲。）有关极化（或偏振）的详细内容对于理解量子电动力学的精神和特性虽说不是必不可少的，但是，当然要想对任何实际过程做正确的计算，它们是必不可少的，而且，往往具有深刻的影响。

在这几讲中，我们主要讲解了电子和光子间在很小距离上的相当简单的相互作用，而且只涉及很少几个粒子。但现在我想就这种相互作用在较大空间里如何进行谈几句。在这里，相互间交换光子的数量非常大，在这样的大尺度上，箭头的计算就很复杂了。

但是，有些情况并不太难进行分析。例如，在有些场合，光源发射一个光子的振幅同其他光子是否被发射无关。这可能发生在光源（即光源原子的核）很重，或者极大量的电子全都以相同方式运动（如广播电台天线内的电子的上下运动，电磁线圈内的电子的绕线圈旋转）的情况下。这时会有大量的光子被发射出来，而所有光子全都属于同一类型。电子在这种环境下吸收一个光子的振幅与这个电子或其他电子此前是否吸收过其他光子无关。这样，这个电子的全部行为仅用它吸收一个光子的振幅即可描写清楚，这个振幅仅取决于电子在空间和时间中的位置。物理学家用普通的话语来描述这种情况。他们说这个电子在外场中运动。

物理学家用“场”这个词描述一个其大小取决于它在空间中所处位置的量。空气的温度是个很好的例子：温度随你在何时何处进行测量而改变。当把极化或偏振考虑在内时，这个场就有了较多的分量。（共有四个分量——分别对应于吸收处于四类不同偏振态（X、Y、Z、T）之一的光子的振幅——专业上我们把它称为矢量和标量电磁势。将这些综合起来，经典物理推导出更方便的分量——称为电场和磁场。）

在电场和磁场变化足够慢的情况下，电子长距离移动的振幅取决于它的路径。同我们早些时候看到的光的情况一样，相邻路径的振幅的角度几乎相同的那些路径是最重要的路径。结论就是：粒子并不是必走直线。

这就把我们大家带回到经典物理。经典物理假设存在着场，电子在场中移动的方式是使某个量取最小值。这是量子电动力学规则如何导出大尺度现象的一个例子。从这里我们可以向四面八方扩展，不过我们还得局限在这个讲座圈定的范围之内。我只想提醒你们记住一点：我们在大尺度上看到的效应和在小尺度上看到的奇异现象，两者都是电子同光子相互作用的效果，而且两者最终都可以由量子电动力学的理论加以描述。

注释

①把这个情况完整地讲出来是很有意思的：如果A、B两处的探测器有毛病，它们只在某些时间里探测光子，那么就有三种可以区分开来的最终状态：1）A与D处的探测器作响；2）B与D处的探测器作响；3）只有D处的探测器作响，而A、B两处却无动静（它们停在初始状态）。前两个事件概率的计算方法在上面已经讲了。（只是还有额外的一种情况没有讲，即由于A【或B】处探测器有毛病，它们作响的概率减小了。）在只有D处探测器作响的情况下，我们不能把两种情况区分开——大自然引入干涉来和我们开玩笑——答案同没有探测器的时候一样（只是最终箭头需缩短为那两个探测器未作响的情况），最终的结果是个混合，是所有这三种情况的简单相加之和（见图51）。当探测器的可靠性提高时，我们得到的干涉就少一些。

②在这几讲里，我都将把点的空间位置标在沿X轴的一维直线上。要将点标在三维空间里，需建一个“房子”，还需量出这个点到屋顶，及相邻两堵墙的距离（它们之间均是直角）。这三个测量值可标为X_1、Y_1和Z_1，这个点与测量值为X_2、Y_2和Z_2的第二个点之间的距离可用“三维毕达哥拉斯定理”来计算：实际距离的平方是

$$(X_2-X_1)^2+(Y_2-Y_1)^2+(Z_2-Z_1)^2$$

它与时间差的平方之差

$$(X_2-X_1)^2+(Y_2-Y_1)^2+(Z_2-Z_1)^2-(T_2-T_1)^2$$

——有时称为“间隔”（the Interval）或I，爱因斯坦相对论说P（A至B）必须取决于这个综合值。对P（A至B）最终箭头做出主要贡献的地方正是你所期待的，即距离之差与时间之差相等的地方（就是说I是零）。但I不为零的情况对P（A至B）也是有贡献的，贡献的大小与I值成反比：当I大于零（即光走得比c快）时，它指向三点钟的方向；当I小于零时，它指向九点钟。后面这两项贡献在许多场合下都被抵销掉了（见图56）。

③E（A至B）的公式是复杂的，但有个很有趣的方式可以解释它到底是什么。E（A至B）可以表示为一个电子从时空图中的点A到点B的许多不同方式的和，这个和非常大（见图5）：电子能够来个“一步飞”（one-hop flight），从A直达B；能来个“两步飞”，在中间某点C停一下；也能“三步飞”，在D、E两点稍事停留等等。根据这个分析，每一步（从一点F到另一点G）的振幅是P（F至G），这和光子从点F至点G的振幅是相同的。每一“停”的振幅可由n^2描述，n和我曾提到过可用来使计算得出正确结果的那个n是同一个数。

所以，E（A至B）的公式是一系列的项：P（A至B）【“一步飞”】+P（A至C）$\times n^2\times$P（C至B）【“二步飞”，在C处停一下】+P（A至D）$\times n^2\times$P（D至E）$\times n^2\times$P（E至B）【“三步飞”，在D和E处停一下】+……对所有可能的中间点C、D、E等等。

注意当n变大时，那些非直接路径可以对最终箭头做较大贡献，当n为零（如光子）时，所有带n的项都销掉了（因为它们也都等于零），只剩下第一项P（A至B），这样，E（A至B）同P（A至B）就密切相关了。

④这个数，即发射或吸收一个光子的振幅，有时就叫做一个粒子的“电荷”。

⑤如果把电子的极化效应考虑在内，这“第二方式箭头”就应该被减去——即转180°再相加。（这一讲后面还要再详细讲讲这个问题。）

⑥这两个作用方式较复杂的实验的最终状态与最初讲的那两种作用

方式较简单的状态（电子始于点1和2，终止于点3和4）相同，这样，这复杂些的状态同当初那两个就区分不开了。所以，我们必须把这两种方式的箭头与前面那两种方式的箭头加起来。

⑦这类在实验的最初或最后状态决不真正出现的被交换的光子，有时叫做“虚光子”（virtual photon）。

⑧1931年狄拉克提出存在着“反电子”，第二年C·安德逊（Carl Anderson）在实验中发现了这种粒子并称之为“正电子”。今天已经很容易造出“正电子”（例如，让两个光子对撞），并用磁场将其保持数周之久。

⑨光子交换的振幅是（-j）×P（A至B）×j——两个耦合及光子从一处运动到另一处的振幅。质子与光子有一个耦合的振幅是（-j）。

⑩弧的半径显然取决于每一薄层箭头的长度，这个长度最终由玻璃原子中的电子散射光子的振幅S来决定。计算这个半径时，可将三个基本作用的公式用于大量有关的光子交换，然后将振幅加起来。这是个相当困难的问题，但是对于相对简单的物质，半径计算是很成功的。运用量子电动力学的观点，半径随物质不同而不同是很好理解的。但是必须说明，还从来没有对于像玻璃这样复杂的物质从最基本的原理出发作过直接的计算。在这类情况下，半径是由实验决定的。对于玻璃，实验确定的半径是大约0.2（当光以直角直接照射玻璃时）。

[11]各层反射箭头（它们组成一个“圆”）的长度和使得透射的最终箭头多旋转一些的那些箭头长度相同。所以，在物质的部分反射和它的折射率之间是有联系的。

看起来最终箭头的长度变得大于1了，这意味着从玻璃出来的光要比进去的光还多！之所以看来如此，是因为我忽略了一些振幅——如一个光子下到一层，一个新光子散射上来到另一层，然后第三个光子散射返下来通过玻璃，还有一些产生更复杂情况的可能性——结果有一些小箭头弯转回来，使得最终箭头保持在0.92和1之间（所以光被这层玻璃反射和透射的可能性的总和永远是100%）。

4.松散的结尾

我打算把这一讲分为两部分。第一部分，我准备讲讲同量子电动力学理论本身有关的问题，这里假定这个世界上存在的全部东西就是电子和光子。然后我将谈谈量子电动力学同物理学其他部分的关系。

量子电动力学最令人惊骇的特点是它那古怪得要命的振幅结构。你也许会以为这里隐含着什么问题！但是物理学家摆弄振幅已经有五十多年，对它已经很习惯了。而且，我们所能观察到的全部新粒子和新现象，都与振幅结构所能推导出来的每个结果（如干涉等等）符合得极好。根据振幅结构，一个事件的概率是代表该事件的最终箭头平方，而最终箭头的长度取决于诸箭头以有趣的方式的合成。这样看来，振幅结构在实验上是毫无问题的：你尽可以从哲学上为振幅到底意味着什么（如果，它们的确意味着什么的话！）而伤脑筋，但是由于物理学是一门实验科学，只要这个结构同实验相符合，对我们来说，它就足够好了。

有大量问题同量子电动力学理论有关，所以需要提高计算所有小箭头之和的本领——对不同情况下处理问题的行之有效的不同技巧——这使研究生需要花费三、四年的时间才能掌握它们。这些只是技术上的问题，所以我不打算在这里讨论。只要不断改进分析这个理论在各种不同的情况下须具体讲些什么的技术就行了。

但是，另外有一个表征量子电动力学本身特点的问题，人们花了二十年的时间才将它解决。它同理想电子和光子以及数n与j有关。

如果电子是理想电子，而且在时空图中从一点至另一点只走直线（见图77左），那就什么问题都没有了：n就是电子的质量（我们可通过观测确定这个量），j就是它的“电荷”（电子同一个光子耦合的振幅），也可由实验来确定。

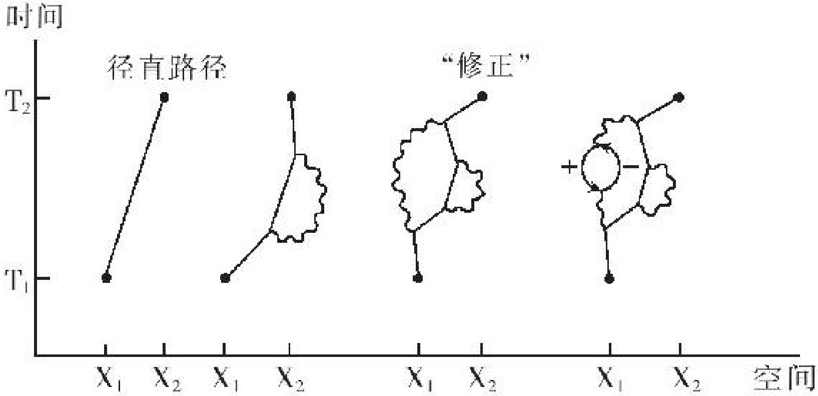


图77　在计算电子在时空图上从一点到另一点的振幅时，对于径直到达的情况我们用公式E（A至B）。（然后我们再作"修正"，把一个或多个光子被发射和吸收的情况包括进来。）E（A至B）取决于（X_2-X_1）、（T_2-T_1）和n, n是我们为使答案正确而塞到公式里面的一个数。数n被称为"理想"电子的"静止质量"，它不可能由实验测定，因为真实电子的静止质量m包含了所有的"修正"。计算用于公式E（A至B）的这个数n相当困难，用了二十年才解决。

但是，这样的理想电子并不存在。我们在实验室观测到的质量是真实电子的质量，这些电子不时发射和吸收它自己的光子，因而质量取决于耦合振幅j。我们观测到的电荷则介于真实电子和真实光子（它随时有可能形成电子-正电子对）之间，因而它取决于E（A至B）。这个E（A至B）包含数n（见图78）。由于电子的质量和电荷受这些以及所有其他可选路径的影响，实验上测定的电子质量m和电子电荷e均不同于我们计算中用的数n和j。

如果在n和j与m和e之间存在着确定的数学关系，那还是没有问题的：我们可以从简单的计算我们所需要的n和j值开始，然后得到观测值m和e。（如果计算值同m和e不符，我们会把最初的n和j稍稍动一动，直到同实验值吻合为止。）

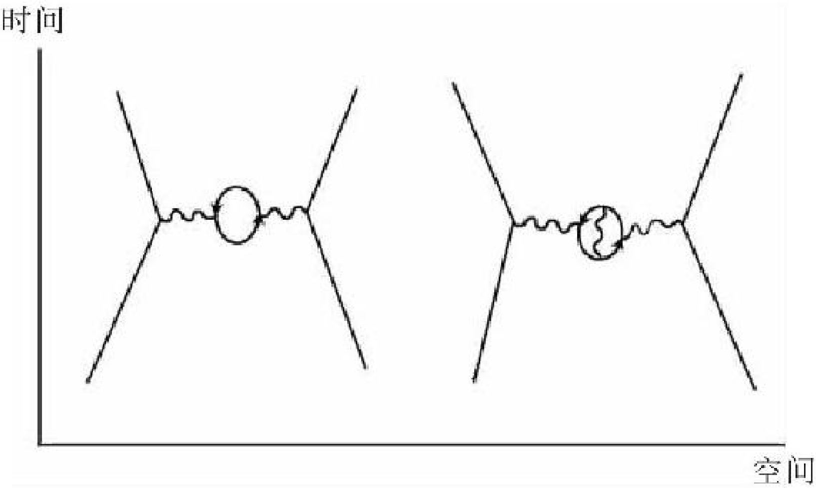


图78　实验上测定的一个电子与一个光子耦合的振幅，即那个神秘的数e，是由实验确定的一个数，它包含了一个光子在时空图中从一点至另一点的全部“修正量”，图中示出其中的两个。在计算时，我们需要一个数j，它不含这些“修正量”，而只含光子从一点直接至另一点的振幅。计算这个j值所遇到的困难与计算n值的困难很类似。

现在来看看我们实际上是怎样计算m值的。先写出一系列的项（多少有点类似我们以前看到的一系列关于电子磁距的项）：第一项没有耦合——就只是E（A至B），它代表一个理想电子在时空图中从一点径直到达另一点。第二项有两个耦合，代表有一个光子被发射并吸收。接下去的项则分别是有四、六、八个耦合，等等（一些这类修正示于图77）。

在计算带耦合的项时，我们必须（一如既往地）把所有可能发生耦合的点都考虑在内，直到耦合的两点重叠在一起——即它们之间距离为零。问题在于，当我们的计算试图把直到距离为零的所有情况都包括在内时，这方程在我们面前爆炸了，它给出毫无意义的结果——类似于无穷大之类的东西。在量子电动力学开始创立时，这个问题使它陷入巨大的困境。人们无论计算什么问题，所得的结果都是无穷大！（为了数学上的一致性，人们在计算时应该能够计及零距离。但是，就是在零距离上不存在有任何意义的n或j。这就是麻烦所在。）

好，这回我们的计算不把直至零距离的所有可能耦合的点全都包括进来，而止于相互间距离相当小的耦合点——例如说10^{-30}厘米，比实验上观测的任何量（目前为10^{-16}厘米）还小万亿倍，这样，我们要用到的n和j都会有确定的值，计算出来的质量可同实验上观测到的m值相比，计算出来的电荷可同实验上观测到的e值相比。不过，还是有问题！如果另外有人一道工作，他们把计算止于一个不同的距离——比如说10^{-40}厘米，结果他们所得到的n和j（为算出同样的m和e而需要的）是不同

的。

二十年以后，1949年，H·贝特（Hans Bethe）和V·韦斯科夫（Victor Weisskof）注意到这样一件事：如果有两个人，取不同的终止距离，由同一m和e去确定n和j，然后用所得的n和j去解决另外某个问题——他们各自采用适合于自己然而彼此不同的n和j值，在将所有项的所有箭头都包括在内之后，他们对这“另外某个问题”的答案竟几乎是相同的！事实上，在计算n和j值时所取终止距离同零距离越接近，对这个问题的最终答案就会同实验符合得越好。为了进一步证实这点，施温格、朝永振一郎和我三个人分别独立地发现了进行有限计算的方法（我们为此而获奖）。人们终于能够用量子电动力学理论进行计算了。

所以，看来取决于耦合点之间小距离的只是n和j的值——这是两个无论如何不能直接观测的理论值，而所有其他的可观测量，看来都不受影响。

我们为求出n和j所玩的壳层游戏，在专业上叫做“重正化”（renormalization）。但是，不管这个词听来多聪明，我却说这个过程是蠢笨的！求助于这类戏法妨碍了我们去证明量子电动力学在数学上的自洽性（self-consistent）。令人不解的是，尽管人们用了各种办法，这个理论至今仍未被证实是自洽的；我猜想，重正化在数学上是不合法的。我们还没有一种好的数学方法描述量子电动力学，这是肯定的——像这样描述n、j同m、e之间关系的语言不是好的数学。①

有一个很深刻、很漂亮的问题，它同可观察的耦合常数e（真实电子发射或吸收一个真实光子的振幅）有关。e是个很简单的数，实验上确定它接近于-0.08542455。（我的物理学朋友们不承认这个数，因为他们喜欢把e记成这个数的平方的倒数：约137.03597，不定度是小数点后最后一位大约2。这个数字自五十多年前发现以来一直是个谜，所有优秀的理论物理学家都将这个数贴在墙上，为它大伤脑筋。）

你们立刻就想知道这个用于耦合的数到底从什么地方来的，它是与圆周率π有关呢，还是同自然对数的基e有关呢？没人知道！它是物理学中最大的谜之一，一个该死的谜：一个魔数来到我们身边，可是没人能理解它。你也许会说“上帝之手”写下了这个数字，而“我们不知道他是怎样下的笔”。我们知道实验上怎样摆弄就能把这个值测定得很精确，但我们不知道在电脑上怎样摆弄才能把这个数堂堂正正地算出来！

一个好的理论也许会说e是2π与3的平方根之积再除1，等等诸如此类的东西。经常不断就有建议提出来，说e应该是什么什么，但没有一个是有用的。A·爱丁顿（Arthur Eddington）第一个用纯逻辑证明物理学家所喜欢的这个数肯定精确地为136，这是那时的实验值。后来当更精确的实验表明这个值接近于137时，爱丁顿于是发现他早期的讨论中有个小错误，并再一次用纯逻辑推出，这个值肯定是整数137！每一次，总有什么人注意到π值同e（自然对数之基）值的某种组合，或2和5

的某种组合能给出这个神秘的耦合常数。有一个事实为那些摆弄代数的人所不喜欢，那就是用π值和e值等数值所能造出来的数之多，简直会让你吃惊。这样，在整个现代物理学史上，关于制造一个精确到小数点后面几位的e的论文可说是连篇累牍，只是它们一次又一次被下一轮改进了的实验证明它们同实验值不符。

尽管我们今天不得不借助于蠢笨的程序来计算j值，但是有可能在将来的某一天，人们发现了j和e之间合理的数学联系。那就意味着j是那个神秘的数，从j再求出e，到那时，毫无疑问，又会有另一批论文出来告诉我们如何“赤手空拳”凭空计算出j，例如说，提出j是4π分之一等等。

与量子电动力学有关的问题到这里就全部讲完了。

在准备这个讲座时，我原想只讲讲物理学中我理解得最好的这部分，把它讲透彻了，不讲其他。现在我们已经把这部分全讲完了，但是作为一个教授（这就意味着总习惯于讲呀讲，不会适可而止），我还是禁不住要给你们讲讲物理学的其余部分。

首先，我必须立即声明，物理学的其他部分可远不象量子电动力学这样得到那么好的验证：我准备给你们讲的内容里，有的是些好的猜测，有的是半截子理论，另一些则是纯思辨。所以这一讲和其他几讲比起来会显得有点乱，也不完善，很多细节都省略了。但是，说到头来正是量子电动力学的理论结构为描述物理学其余部分的其他现象提供了极好的基础。

我先讲讲构成原子核的质子和中子。在质子和中子被发现之初，人们都认为它们是简单粒子，但很快发现它们并不简单——这里说的“简单”，意思是它们从一点至另一点的振幅都可以用公式E（A至B）来解释说明，只是二者各用不同的n。例如，质子的磁矩，如果用和电子同样的方法来计算，应当是接近1，但事实上，实验的结果却非常奇怪，竟是2.79！这样，人们很快就认识到，质子内部有什么过程在进行，还没有被量子电动力学的方程计算在内。还有中子，如果确实是中性的话，应该完全没有磁相互作用，可它的磁矩大约为-1.93！这样，大家都早已知道中子内部也有什么可疑的活动。

还有一个问题就是，在核内到底是什么东西把中子和质子束缚在一起。人们当时就认识到这不可能是光子的交换，因为把核子束缚在一起的力要强得多——打碎一个核所需的能量要比把一个电子从原子里敲出去所需的能量多得多，这两个能量之比同原子弹的破坏力与炸药的破坏力之比是一样的：炸药的爆炸是电子图形的重新安排，而原子弹的爆炸则是质子-中子图形的重新安排。

为了了解到底是什么把核子束缚在一起，人们做了很多实验，将能量越来越高的质子射向原子核。人们预期的是只有质子和中子被打出来。但是，当能量足够大时，新粒子出来了。首先是π介子，然后是λ超

子，Σ超子，ρ介子，它们把字母表都占用完了。接着出来的粒子带上了数目字（它们的质量数），例如Σ1190和Σ1386。很快，事情清楚了：世界上的粒子的种数尚无尽头，它取决于打碎原子核所用能量的大小。目前已有四百种以上这类粒子。我们不可能接受四百种粒子；那也太复杂了！②

象M·盖尔曼（Murray Gell-Mann）这样伟大的创造者都像是发了疯一样极力试图找出所有这些粒子的行为规则。七十年代初，他们提出了强相互作用的量子理论（或叫做“量子色动力学”[quantum chromodynamics]）。它的主要角色是叫做“夸克”的粒子。所有那些由“夸克”组成的粒子可分成两类：有些粒子，如质子和中子，是由三个夸克组成的，而且有个可怕的名字，叫“重子”（baryon）；另外一些粒子，如π介子，则是由一个夸克和一个反夸克组成的（名为“介子”）。

现在我来按今天我们所了解的基本粒子的情况做个基本粒子表（见图79）。我将从在时空图中两点间按公式E（A至B）——用与电子同样的极化规则加以修正——运动的粒子开始，它们叫“自旋1/2”的粒子。这类粒子中的第一名是电子，它的质量数是0.511，单位是我们一直沿用的，叫做百万电子伏（MeV）。③

在电子下面，我要留一个空位（以后填上），这个空位的下面我列上两类夸克——d夸克和u夸克，这两种夸克的质量还知道得不确切：一个较好的估计是，每一种都大约是10MeV。（中子比质子稍重一些，看来这暗示——等一下你将会看到——d夸克比u夸克要稍重一点。）

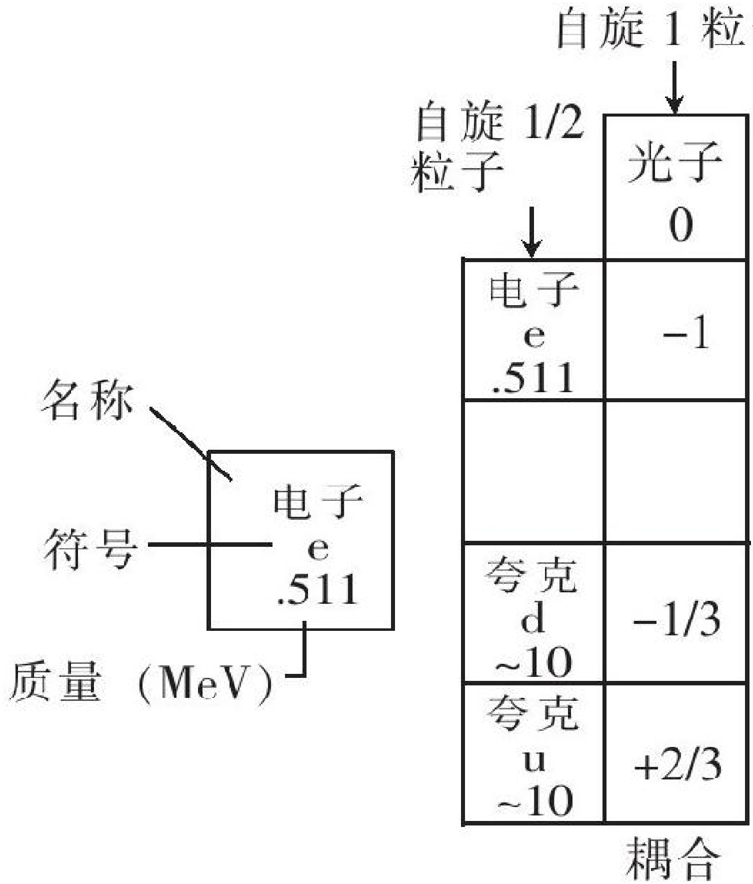


图79　我们这个世界粒子总表从自旋1/2粒子开始：电子（质量为0.511MeV），和两种“味”的夸克d和u（二者质量均为10MeV）。电子和夸克都有“电荷”，那就是说它们都同光子耦合，耦合量分别为（以耦合常数-j为单位）：-1，-1/3，+2/3。

在每个粒子的旁边，我都以-j（它跟电子与光子的耦合数相同，但符号相反）为单位列出它的电荷或耦合常数。这样，电子的电荷将为-1，这与从B·富兰克林（Benjamin　Franklin）开始一直延续下来的习惯用法是一致的。对d夸克来说，同一个光子耦合的振幅是-1/3，对u夸克，它是+2/3。（如果B·富兰克林早知道有夸克这回事，他可能会把一个电子的电荷定为至少是-3！）

现在，质子的电荷为+1，中子的电荷为零。摆弄摆弄数字，你就可以看出，一个由三个夸克构成的质子肯定是两个u和一个d，而也由三个夸克构成的中子则肯定是两个d和一个u（见图80）。

是什么把夸克维系在一起呢？是光子的来回穿梭吗？（因为一个d夸克的电荷为-1/3，一个u夸克为+2/3，夸克象电子一样，发射和吸收

光子。）不，这种电力太微弱了，根本不能把夸克束缚住。人们想象出另一种东西往复穿梭把夸克维系在一起，它叫做“胶子”。④“胶子”是另一类所谓“自旋1”的粒子（像光子一样）。它们在时空图上从一点运动到另一点的振幅由同光子完全一样的公式P（A至B）精确地确定。胶子为夸克所发射和吸收的振幅是一个神秘的数g，它比j要大得多（见图81）。

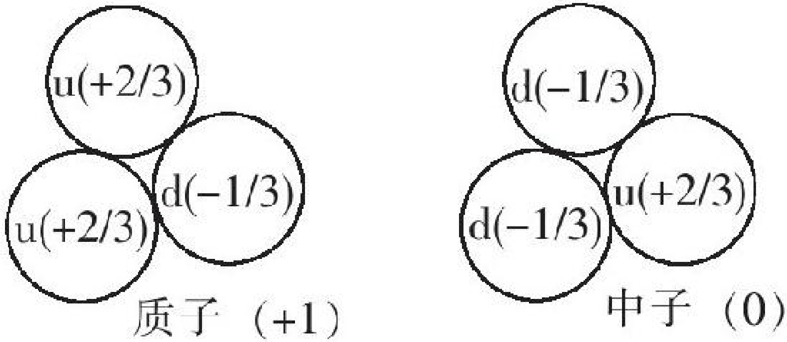


图80　所有由夸克组成的粒子可分为两大类：一类由一个夸克和一个反夸克组成，一类由三个夸克组成，质子和中子就是由三夸克组成的最普通的例子。d、u夸克电荷的搭配，使质子电荷为1，中子电荷为零。质子和中子由（在它们里面到处运动的）带电粒子组成这个事实给我们一个线索去解释：为什么质子的磁矩大于1，而设想是中性的中子有磁矩。

我们画的夸克之间交换胶子的图同我们以前为电子之间交换光子所画的图很相像（见图82）。事实上，这两个图太相像了，以至你们可能认为物理学家实在缺乏想象力，对于强相互作用，他们也只能照搬量子电动力学的理论！不错，你们说对了，我们正是这样做的，不过新花样还是稍微有一点！

夸克还有另一类极化，它同几何学无关。这些白痴物理学家（他们再也创造不出古希腊那样优美的词汇）给这类极化起了个不幸的名子，叫“色”（color），实际上它与通常意义上的颜色毫无关系。在一个特定的时刻，一个夸克可以处于三种状态——或者说三种“色”——R、G或B（你能猜出它们是指什么吗？）中的任何一种[R，取自“Red”（红的）的字头；G，取自“Green”（绿的）字头；B，取自“Blue”（蓝的）的字头。——译注。]。夸克在发射或吸收一个胶子时，它的“颜色”会改变。根据不同色的夸克之间的耦合，胶子可分为八类。例如，一个红夸克如果变为绿的，它会发出一个红-反绿胶子——这是一种从红夸克中取出红并赋之以绿的胶子（“反绿”[antigreen]的意思是在反方向带绿的胶子）。这种胶子被绿夸克吸收，于是这绿夸克变为红的（见图83）。有八种不同的可能的胶子，如红-反红，红-反蓝，红-反绿等等（你恐怕想

到应该共有九种，由于专业上的原因，有一种给略掉了）。这个理论不很复杂。胶子的全部规则是：胶子同有“色”的东西耦合，它唯一需要的就是做点儿簿记工作，记下这些“色”运动的踪迹。

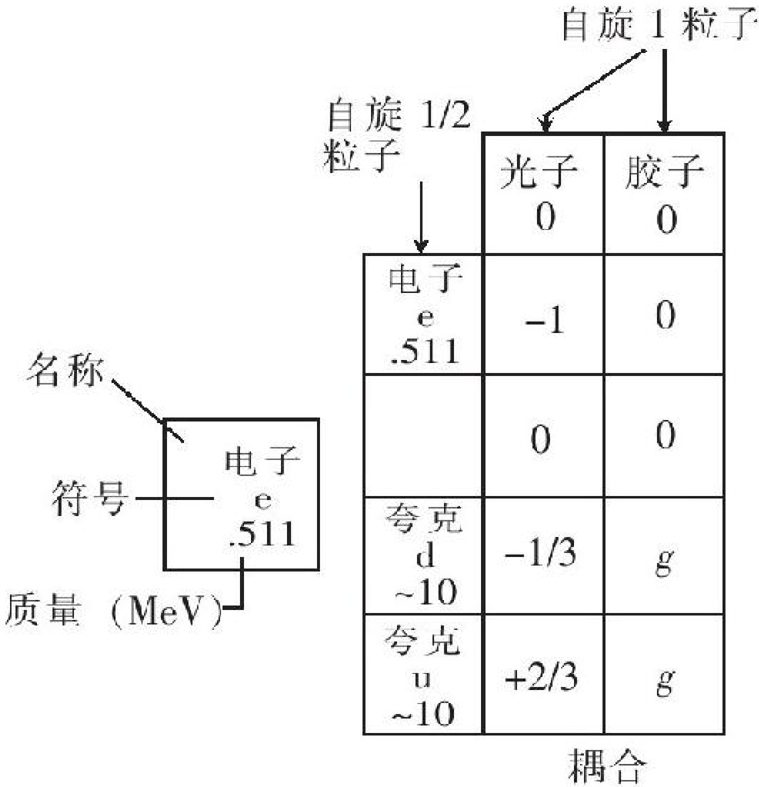


图81　“胶子”把夸克维系在一起组成质子和中子，它是质子和中子能把它们自己束缚在原子核内这个事实的间接原因。胶子维系夸克的力比电力强得多。胶子的耦合常数g远大于j，这使得对它们耦合项的计算要困难得多：到目前，我们所期望的最好的精确度也只达10%。

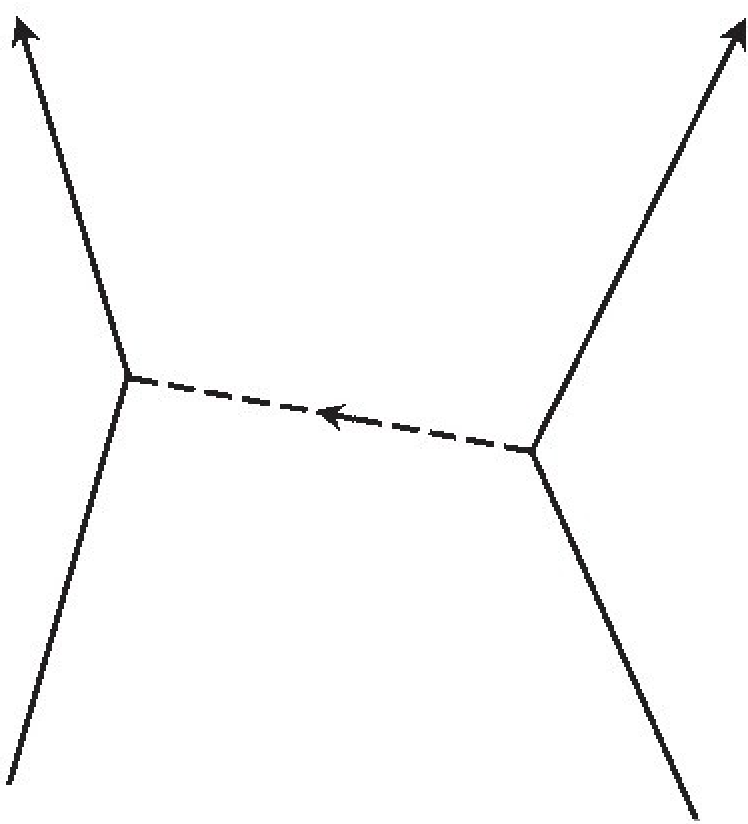


图82　这是两个夸克能交换一个胶子的一种方式，此图看来同两个电子交换一个光子的图太相似了，你也许认为物理学家照搬量子电动力学的理论来处理把质子和中子内的夸克维系在一起的“强相互作用”。不错，他们——几乎——就是这么干的。

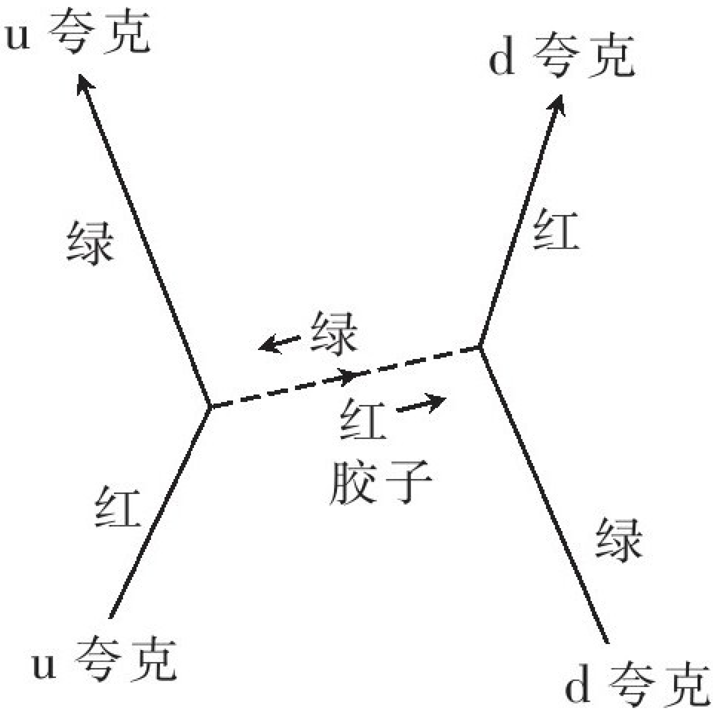


图83　胶子理论与量子电动力学不同之处在于胶子是同所谓“带色”的东西（处于“红”、“绿”、“蓝”这三种可能的状态之一）耦合。这里是一个红u夸克发射出一个红-反绿胶子变为绿u夸克，而一个绿d夸克吸收了这个红-反绿胶子变为红d夸克。（如果“色”在时间上反向倒行，这个“色”的前面就加“反”字。）

但是，这个规则会带来一个很有意思的可能性：即胶子能够同其他胶子耦合（见图84）。例如，一个绿-反蓝胶子碰上一个红-反绿胶子，结果是一个红-反蓝胶子。胶子理论很简单——你就画个图，跟着“色”走就行了。在所有的图中，耦合强度都由胶子的耦合常数g来确定。

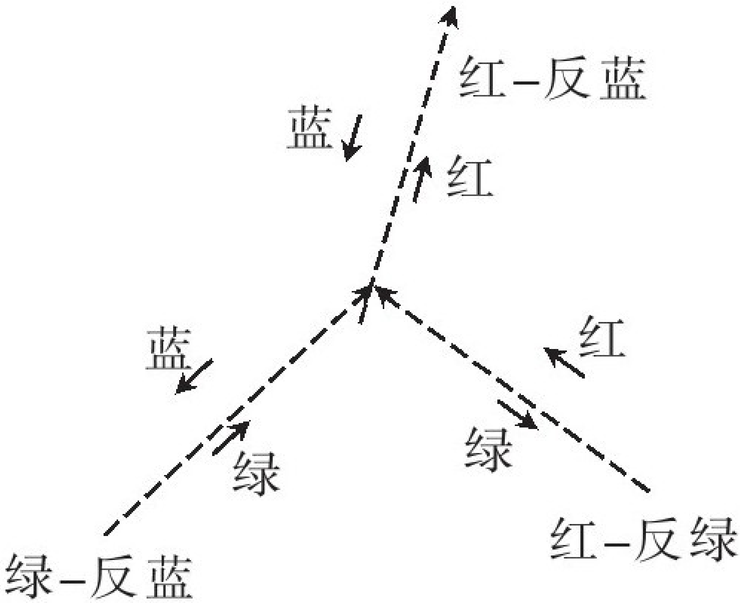


图84　由于胶子本身是带“色”的，他们彼此间能够耦合。这里是一个绿-反蓝胶子同一个红-反绿胶子组成一个红-反蓝胶子。胶子理论很容易理解，你只要跟着“色”走就行了。

胶子理论在形式上确实同量子电动力学没有什么大不同。那么，它同实验比较怎么样呢？例如，质子磁矩的观测值同它的理论计算比较，怎么样呢？

实验是很精确的——它们表明质子磁矩是2.79275。在最佳情况下，理论只能给出2.7加减0.3，——如果你对你的分析结果非常乐观的话，那么我告诉你，10%这个误差比实验的精确度差了一万倍！我们有一个简单明确的理论，设想用它可以解释质子和中子的所有性质，但我们这个理论不能用来做任何计算，因为它需要的数学对我们来说太难了。（你们大概能猜得出，我现在正在做什么工作，以及我的工作毫无进展。）我们的计算之所以精确度不够高，是因为胶子的耦合常数g比电子的耦合常数大得多。带两个、四个、甚至六个耦合的项并不是对主振幅的小小修正；他们对结果有不可忽视的重要贡献。这样，就有代表许多不同可能性的许多箭头，而我们还不能用一种合理的方法把最终箭头找出来。

书上通常说，科学是简单的：你造个理论，拿它和实验比较；如果理论不灵，你就抛弃它再造个新的。这里我们有明确的理论，也有数以百计的实验，但我们没法进行比较！这种情况在物理学史上还从来没有过。我们暂时陷入困境，提不出什么计算方法。我们是叫这些小箭头给镇住了。

尽管理论的计算上有困难，但我们在定性上对量子色动力学（夸克与胶子的强相互作用）确实还是有些理解。我们见到的由夸克构成的物体都是“色”中性的：三个夸克一组的都包含三色夸克各一个；而夸克-反夸克对为红-反红，绿-反绿，蓝-反蓝的振幅则是相同的。我们也理解为什么夸克永远不可能作为单个粒子给产生出来——为什么无论以多大能量的核去轰击质子，出来的也不是单个的夸克，我们所见到的是一股介子和重子（夸克-反夸克对及三夸克组）喷出来。

量子色动力学和量子电动力学并没有把物理学囊括无遗，根据这两个理论，一个夸克不能改变它的“味”，就是说，一旦是u夸克，就永远是u夸克；一旦是d夸克，就永远是d夸克。可是，自然界有时并不照此办理，有一种进行得很慢的放射现象，叫做β衰变（就是人们担心从核反应堆里泄露出来的那种东西），它涉及到一个中子转变为质子的过程。由于中子包含两个d类夸克和一个u类夸克，而质子包含两个u类夸克和一个d类夸克，所以实际发生的事情是中子内的一个d类夸克变成了u类夸克（见图85）。发生的过程是这样的：d夸克发射出一种类似光子的新东西叫做W，它可与电子及另一类新粒子（叫做反中微子，即时间上倒行的中微子）耦合。中微子是另一类自旋1/2的粒子（像电子和夸克一样），但它没有质量，也没有电荷（它不同光子作用）。它也不同胶子作用，而只同W耦合（见图86）。

W是自旋1的粒子（和光子及胶子一样）。它改变一个夸克的“味”，并取走它的电荷，如将电荷为-1/3的d夸克变成电荷为2/3的u夸克，电荷改变了-1。（它不改变夸克的“色”。）由于W_-取走-1的电荷（它的反粒子W＋，取走＋1的电荷），它也能同光子耦合。β衰变用的时间要比光子和电子相互作用的时间长得多，所以人们自然设想W与光子和胶子不同，它的质量一定非常大（约80　000MeV）。⑤我们还不能看见单独的W，因为把一个质量如此大的粒子敲出来需要非常高的能量。

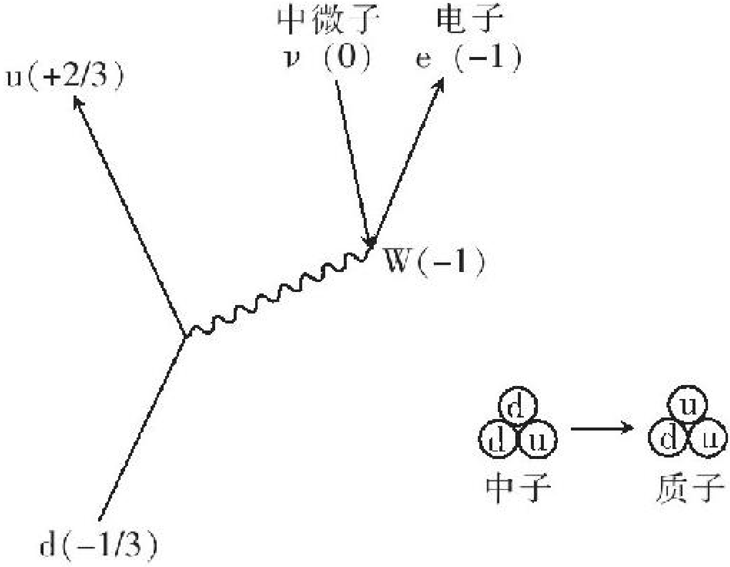


图85　当一个中子衰变为一个质子（所谓的“β衰变”过程）时，伴随着一个电子和一个反中微子释放出来而发生的唯一变化就是一个夸克变了“味”——从d变到u。这个过程发生得相当慢，所以，假设有一个具有很高的质量（约80000MeV），电荷为-1的中间粒子（称做“W-中间-玻色子”）。

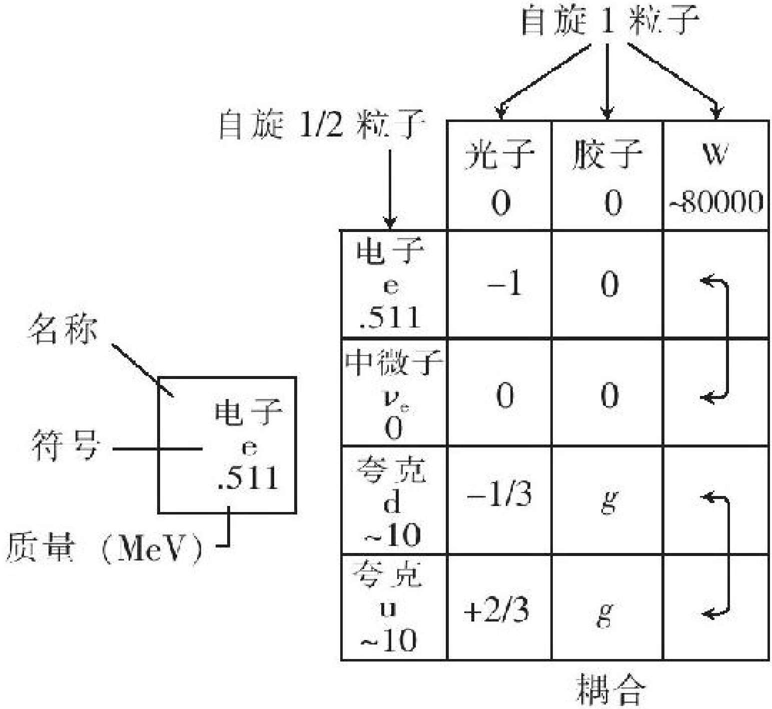


图86　W同电子和（或）中微子耦合，另外也同d和（或）u夸克耦合。

还有一种粒子，我们可以把它看作是中性W，叫做Z_0。Z_0不会改变夸克的电荷，但它确同d夸克、u夸克、电子及中微子耦合（见图87）。这种相互作用有个让人产生误解的名字“中性流”（neutral current），几年以前它被发现时，曾激起一大阵的兴奋激动。

如果你认定三种类型的W之间有三种耦合方式，那么W理论就是一个干净漂亮的理论（见图88）。W的耦合常数的观测值同光子的非常接近——就在j的附近。所以，很有可能这三种不同的W和光子是同一种东西的不同样子。S·温伯格（Stephen Weinberg）和A·萨拉姆（Abdus Salam）曾努力将量子电动力学同所谓的“弱相互作用”（同W的相互作用）综合为一种量子理论，而且他们成功了。但如果你们看一眼他们得出的结果，就会感觉像是在看（打个比方吧！）一团黏胶一样，难以理清线索。显然，光子和三种W有着某种内部联系，但是在目前的理解水平下，这种联系还很难看得清楚——在这些理论中，你仍然可以见到“看来似乎是”这类字样；这些理论还没有推敲好，还没有把这些联系润色得更漂亮一些——因而可能更正确一些。

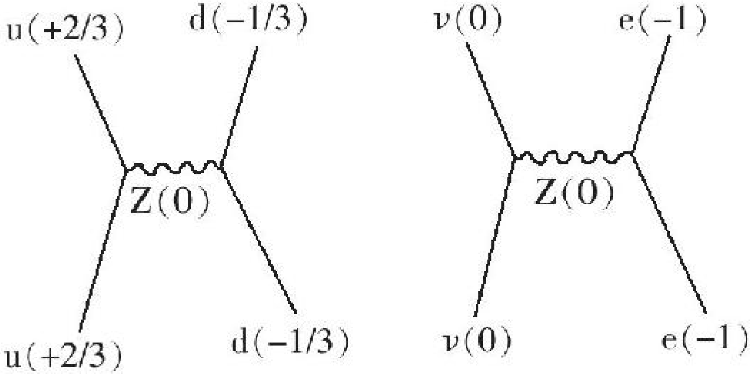


图87　如果任何一个粒子的电荷都不变的话，W也没有电荷（这时的W称为Z_0）。这种相互作用叫做“中性流”，这里示出两种可能性。

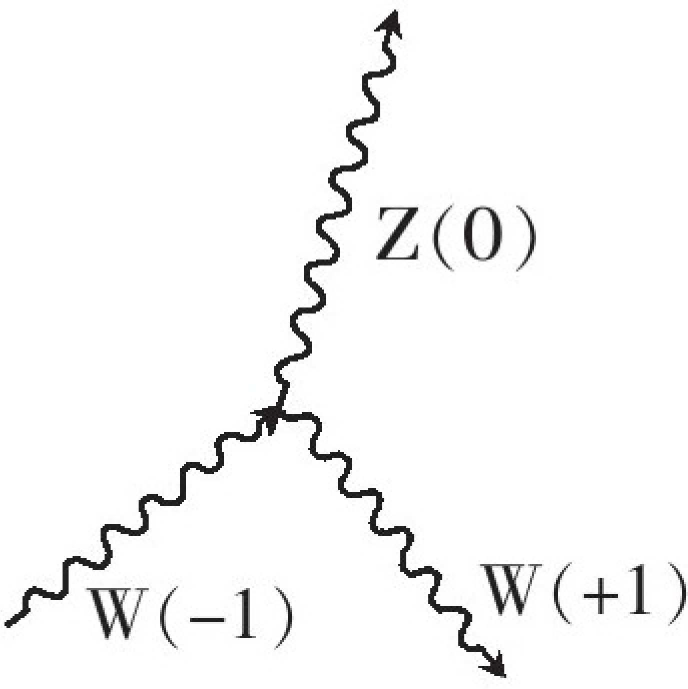


图88　W_{-1}，它的反粒子W_{+1}和中性W（Z_0）之间能够耦合。W的耦合常数与j很接近，这暗示了W和光子可能是同一种东西的不同侧面。

总之，你们看，量子理论有三种主要的相互作用——夸克和胶子的“强相互作用”，W的“弱相互作用”，以及光子的“电相互作用”。根据这个图象，世界上仅有的粒子就是夸克（有u和d两种不同“味”的夸克，每种又分为三种不同的“色”）、胶子（R、G、B的八种组合）、W（带电荷±1和0）、中微子、电子和光子——共六类约二十种不同的粒子（再加上它们的反粒子）。情形看来不坏——大约有二十种不同的粒子

——只是事情还没完。

在用能量越来越高的质子轰击原子核时，新的粒子还是不断出现，其中一种叫做μ子，它在一切方面都像电子，只是质量要大得多——105.8MeV，同电子质量0.511比起来，它要重206倍。情况真好象是上帝就想给质量试验试验不同的数。μ子的所有性质全可以由量子电动力学理论描述出来——耦合常数j同电子是一样的，E（A至B）也是一样的；你唯一要做的是把不同的n值代进去。⑥

由于μ子的质量比电子重约200倍，μ子的记秒表指针比电子的也转得快200倍。这使我们有可能检验在距离比我们以前所能达到的小200倍的情况下，量子电动力学的理论是否仍然有效——虽然这个距离比起这个理论恐怕会遇到无穷大问题的距离仍大10^{80}倍。（见128页的注1）

我们已经知道一个电子可以和一个W耦合（见图85）。当一个d夸克放出一个W而变为u夸克时，这个W可否不同电子耦合，而同μ子耦合呢？可以（见图90）。那么反中微子怎么样呢？在W同μ子耦合的情况下，一种叫做μ-中微子的粒子取代了普通中微子（现在我们要把它叫做电子-中微子）。这样，现在我们的粒子表上紧挨着电子和中微子的地方又多了两种粒子——μ子和μ-中微子。

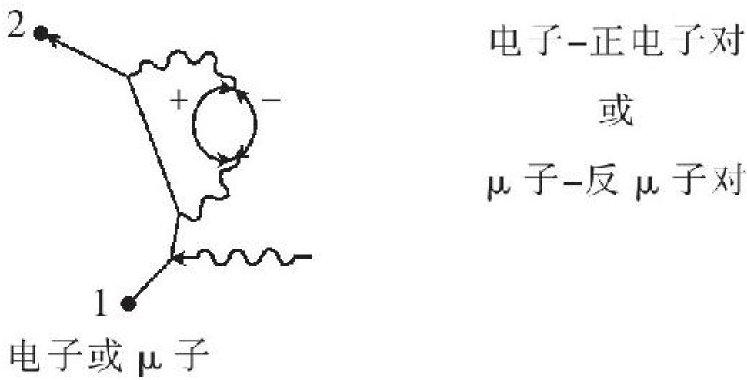


图89　以能量越来越高的质子轰击核子时，新的粒子出现了。其中一种叫μ子，或重电子。描述μ子相互作用的理论同描述电子的完全一样，只是需将一个较大数值的n代入E（A至B）。μ子的磁矩应与电子磁矩稍有不同，这是由于存在着两个特定的选择：当一个电子发射一个光子，这个光子蜕变为一个电子-正电子对，或一个μ子-反μ子对时，它们的质量分别接近于或大大重于那个初始电子的质量；反之，当μ子发射一个光子，而这个光子蜕变为一个正电子-电子对或一个μ子-反μ子对时，它们的质量分别接近于或大大轻于初始μ子的质量。实验证实了这个微小的差别。

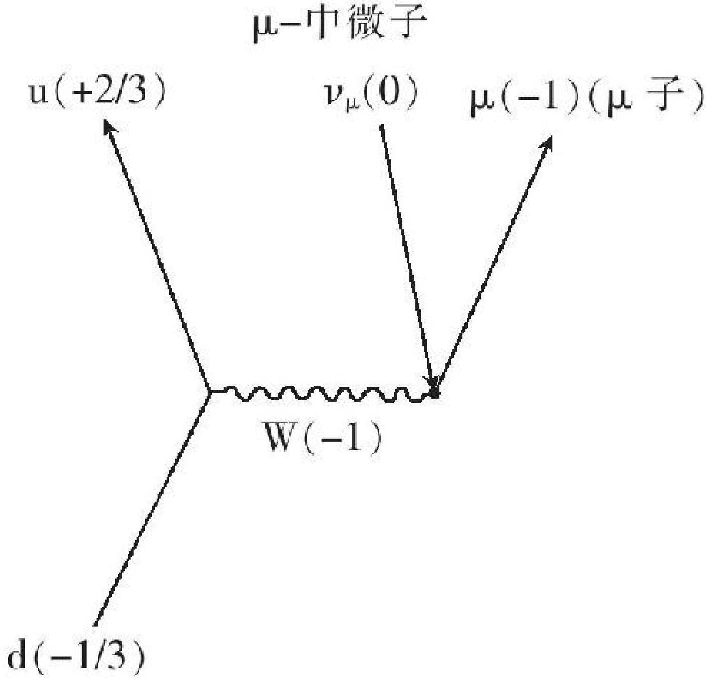


图90　W有发射一个μ子（而不是电子）的振幅，在这种情况下，μ-中微子取代电子-中微子的位置。

那么夸克怎么样呢？从很早的时候起，人们就知道有一些粒子是由比u和d还重的夸克构成的。这样，第三类夸克就进入了基本粒子的行列——它叫做s，s是取自“strange”（奇异）的字头。这个s夸克的质量约为200MeV，相比之下，u和d夸克只有大约10MeV。

有许多年我们一直以为只有三种“味”的夸克——u、d和s，但在1974年，一种叫做ψ子的新粒子被发现了，它不能由这三种夸克组成。不过那时也有个很好的理论上的论据说，非存在第四种夸克不可，这种夸克同W耦合变为s夸克，就同u与d跟W耦合的情况一样（见图91）。这种夸克的“味”叫做c，至于这个c是指什么*，我可没有勇气告诉你们，好在你们可以去看报纸。名字是越起越糟了。（c取自“charm”（妩媚，迷人）的字头。——译注）

具有相同性质但质量要重得多的粒子的不断出现，是个完全不可思议的谜。这个图象的这种奇怪重复是怎么回事呢？正象I·I·拉比（I.I.Rabi）教授在发现μ子时所问的：“是谁命令它们这样的？”

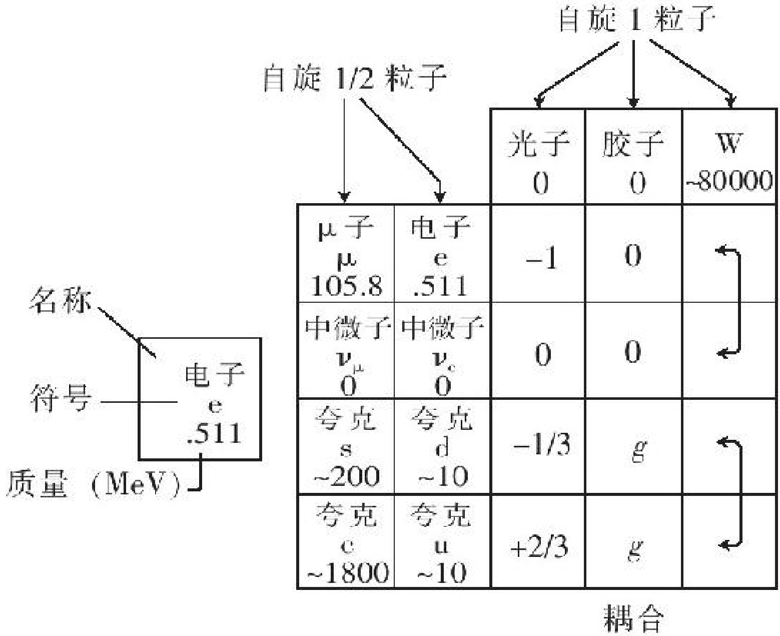


图91　看来自然界是在重复自旋1/2的粒子。除了μ子和μ-中微子以外，还有两种新夸克（s和c），它们同旁边一行位置相应的粒子相比，电荷相同，质量则重得多。

最近，另外一轮重复开始了。在我们把能量提得越来越高时，看起来自然界是在不断地把这些粒子重叠架高，好像要让我们陶醉似的。我必须把这些讲清楚，因为我想让你们知道自然界实际看上去是多么明显地复杂。如果我给你们这样一个印象，由于这个世界上同电子和光子有关的现象我们已解决了99%，那么剩下的1%只需再有另外的1%的粒子来解释就足够，那就全错了。实际上要解释这1%的现象，我们需要另外多用十倍、二十倍的粒子。

好，让我们再往前看，随着在实验中使用甚至更高的能量，我们发现了一个甚至更重的电子——名为τ子，它的质量是1　800MeV，有两个质子那么重！从这个粒子自然推断出有τ-中微子存在。现在又发现了另一个有趣的粒子，这意味着存在一种新“味”的夸克——这次叫它“b”[“beauty”（美丽）的字头]，它的电荷为-1/3（见图92）。好了，现在我想请你们暂时变成一个高水平的基础理论物理学家，请你们预言一下：下一个新味的夸克将被发现，它叫做“____”（取自“____”的字头），它的电荷是____，质量是___MeV，而我们当然希望你的预言是对的，这种夸克确实存在！⑦

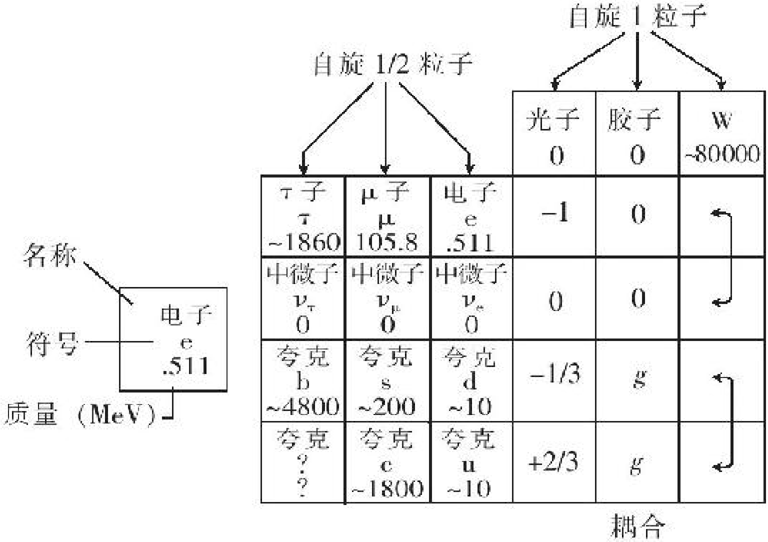


图92　这里我们又重来一遍！自旋1/2粒子在能量甚至更高的基础上开始了另一轮的重复。如果发现一个粒子，它所具有的性质隐含着一种新夸克的存在，那么这一轮重复就算完成了。在此期间，寻找在甚至更高能量基础上的另一轮重复的准备工作又开始了。至于到底是什么东西导致这样的重复，则完全是个谜。

在这期间，实验还一直在进行，看这个循环是否还能再重复。目前正在建造各种机器来寻找甚至比τ子还重的电子。如果这个假想的粒子质量是100　000MeV，我们的机器可造不出这么重的粒子。但如果它是40 000MeV左右，这些机器就有本领把它造出来。

对于理论物理学家来说，这种不断重复的循环真有趣极了：大自然给我们出了这么美妙的智力测验题！大自然，她为什么要重复地造出质量为206倍、为3 640倍的电子呢？

现在我想讲最后一个问题，这样，关于粒子的问题就讲完整了。虽然d夸克同W耦合会变成u夸克，但它还有一个可变为c夸克的小振幅。u夸克虽然可变成d夸克，但它还有一个小振幅可以变为s夸克，甚至还可以一个更小的振幅变为b夸克（见图93）。这样，W就把事情“弄糟”了，它使得夸克可从表中的一行跳到另一行。为什么这些夸克拿出相当比例的振幅变为另一种夸克，这我们完全不知道。

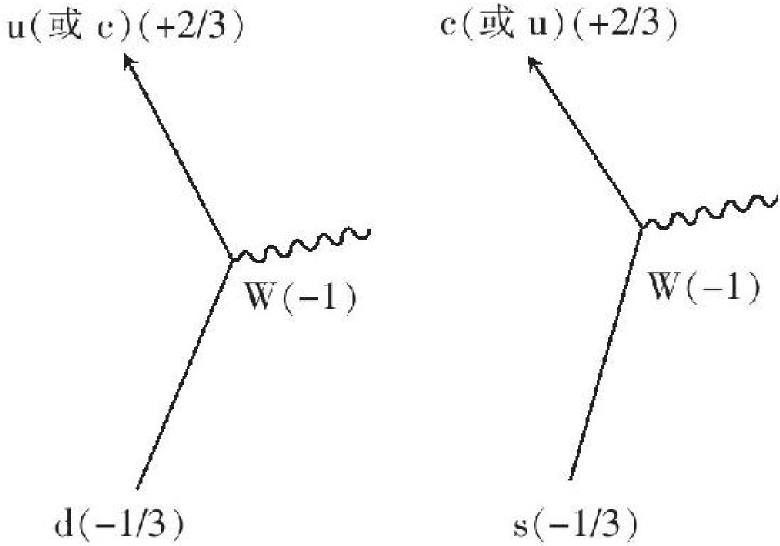


图93　d夸克（除可变为u夸克外）还有一个很小的振幅变为c夸克，s夸克（除可变为c夸克外）还有一个很小的振幅可变为u夸克，两种情况下，都将释放出一个W。所以看来W能够通过改变夸克的味，将表中一行的夸克变为另一行的夸克。（见图92）

好了，量子物理的其余部分我都讲完了。它真是混乱得可怕，你可能会说物理学把自己引入了混乱的绝境，但事情从来就一贯如此。自然界一直就是看起来乱得吓人，但随着我们的前进，就会看到成形的图象，我们也随之把理论综合在一起，这样，一定程度的清晰就会出现，事情就变得简单一点。我刚才给你们描述的混乱状况要比十年前（如果那时我给你们讲这个题目的话）的混乱小得多了，那个时候我要讲四百多种粒子。再想想本世纪初的那个混乱情况吧：那时有热、磁、电、光、X射线、紫外线、折射率（indices of refraction）、反射系数（coefficients of reflection），以及各种不同物质的一大堆其他性质，而自那以来，我们已经把所有这些纳入了一个理论：量子电动力学。

有个问题我想着重讲几句。物理学其余部分的那些理论同量子电动力学的理论很相像：它们都把自旋1/2的物体（如电子和夸克）同自旋l的物体（如光子、胶子、W等）的相互作用纳入振幅结构之内，根据这个结构，一个事件发生的概率就是代表这个事件的箭头长度的平方。为什么物理学所有这些理论在结构上这样相像呢？

有几种可能性。第一是物理学家的想象力有局限：在看待一个新现象时，我们总是试图把它纳入已有的框框里去，直到实验相当多了，我们才会发现旧框框已经不灵了。有个愚蠢的物理学家1983年在加利福尼亚大学洛杉矶分校上课时曾说："这就是自然界的工作方式。这些理论看起来是多么奇妙地相似啊！"虽然他是这么说，但理论的相似并不是因为

自然界实际上真的相似，而是因为物理学家只会这么该死地一而再、再而三地以同样的方式想事情。

还有一种可能性是，它确实就是这么个一再重复的相同的玩意儿——就是说，自然界办事情就这么一种方式，没完没了地重复她的这点子事。

第三个可能性是，事情看起来相似是因为它们是同一个事物——一个较大的背景图象——的各不同的方面，这个较大的图象分裂成各不同的部分，就使得事情看起来不相同，就象一只手上的几个手指头一样。许多物理学家正在非常勤奋地工作，以期拼凑出一个大图象，它能将所有的一切统一于一个博大恢宏的模式之中。这是一个令人神往的追求目标，但是关于这个大图象是什么样子，目前没有一个思辨家同任何另一个思辨家能想到一起去。如果我说这些思辨理论中的大多数并不比你们关于t夸克可能性的猜测深刻，如果我向你们保证他们对t夸克质量的估计也不会比你们的好，这种说法即使是稍稍有一点夸张，也不会太离谱。此为电子书。

例如，看起来电子、中微子、d夸克和u夸克它们都是挺有缘分的——的确，前两者可同W耦合，后两者也是如此。现在人们一般认为夸克只能改变它的“色”和“味”，但是也许夸克在同一种尚未发现的粒子耦合时，能衰变为中微子。这真是个好主意！那么会怎么样呢？这意味着质子是不稳定的。

有人提出这么一个理论：质子是不稳定的。他们做了个计算，并发现宇宙中将不再存在质子了！他们于是摆弄数字，令新粒子有较高的质量，在做过许多努力之后，他们就预言质子将以某一速率衰变，而他们所预言的速率要略小于实验上最新测定——其测定值说明质子至少不会以这个速率衰变——的速率。

在一种新的实验和更加仔细地测定质子之后，这些理论就要修正以逃避压力。这些理论在没有退路的背水一战中曾预言了一个质子衰变速率，而最新的一个实验表明，质子不会以比它慢五倍的速率衰变。你们猜，这回怎么着？这长生不死鸟又再一次飞起来，对理论做了新的修正，需要更新的实验检验它。质子究竟是否衰变，现在仍然不得而知。要证明它不衰变，那是很困难的。

在所有这几讲中，我都没有讨论万有引力问题。原因是两物体之间的万有引力作用极其微弱：万有引力比两电子之间的电力要弱1后面40个零（或许是41个零）那么多倍。事实上，几乎所有的电力都用于将电子维系在它们的原子核附近，相互抵销的吸引力和排斥力在这里形成了一个相当平衡的混合体。但万有引力的情况不同，它只有吸引力，随着原子的越来越多，引力就不断地加大，直到最后，硕大的质量到达有我们身体这样重时，我们就可以开始测量万有引力——对行星、对我们自身，等等——的影响。

由于万有引力比其他任何相互作用都要微弱得多，所以，要把测量万有引力效应的实验做得精确到需用精致的量子万有引力理论来解释的程度，目前还办不到。⑧不过即使理论尚无法检验，万有引力的量子理论倒是确有几个，它们包含了“引力子”（列在新的一类极化的名下，叫做“自旋2”）和其他一些粒子（其中一些的自旋为3/2）。这些理论中最好的理论也不能把我们已发现的粒子都包括进去，却发明了许多我们并未发现的粒子。万有引力的量子理论也遇到耦合项无穷大的问题，但是，使量子电动力学成功地摆脱“无穷大问题”的那个“癫狂的步骤”却无法解救万有引力的危难。所以，我们不仅没有可以检验量子万有引力理论的实验，就连说得通的理论现在也敬告阙如。

综观以上所讲的全部内容，有一个问题还是让人特别不满意，这就是粒子的观测质量m。至今还没有一个理论能对质量数做出很恰当的解释。我们在所有的理论中都使用质量这个数，但是我们不理解它——它到底是什么，是从哪里来的。我相信，从最基本的观点来看，这是个很有意思、需认真对待的问题。

如果这些关于新粒子的推测把你们搅糊涂了的话，我感到很抱歉，不过，我决定给你们讲讲那些定律的特点以结束我对物理学其余部分的讨论，是因为那个特点包括振幅结构、用来表示（被计算的）相互作用的图等等，看来都与量子电动力学相同，而量子电动力学是好理论的最佳榜样。

注释

①描述这个困难的另一个方法是说，关于“两点可以无限靠近”的想法恐怕是错的——即我们可把几何学一直用到最后一道刻痕的假设是错误的，如果我们把两点间的最小可能距离定为小到10^{-100}厘米（今天实验上所涉及的最小距离是在10^{-16}厘米左右），这样“无穷大”就消失了。好，就算这样吧——但另外一些不协调又出现了：比方，一个事件的总的可能性加起来会略微大于或略微小于100%，或者我们得到无穷小的负能量。也有人提出，这个不自洽的起因是由于我们没有把引力效应计算在内——引力在一般情况下非常微弱，但在这样极小距离上，它变得重要了。

②虽然在高能实验中有许多粒子从原子核里面出来，但在低能实验（这是更常见的一般情况）中，人们发现原子核只包含质子和中子。

③一百万电子伏是很小的，一百万电子伏的粒子只有大约1.78×10^{-27}克。

④注意命名：“光子”来自希腊文的“光”字，电子来自希腊文的“琥珀”（电学始于琥珀）。但是随着现代物理学的进展，人们对用希腊文给粒子命名越来越觉得乏味，直到这次，我们索性创造了“gluons”（胶子）这个名字。你能猜出它们为什么叫“胶子”吗？事实上，d和u都是各

指一个词，不过，我不想把你们弄糊涂了——一个d（“down”，底）夸克并不在u（“up”，顶）夸克的下面。附带说一句，所谓d、u，指的是夸克的“味”。

⑤在这个讲座之后，实验达到足够高的能量已将W本身产生出来。它的质量很接近理论预测值。

⑥μ子的磁矩已测量得非常精确——这个值是1.001165924（不定度为小数点后最后一位9），而电子的磁矩是1.00115965221（不定度为小数点后最后一位3）。你恐怕感到有点奇怪，想知道为什么μ子的磁矩比电子的磁矩稍稍高一点。我们的图中，有一个是表示一个电子发射出一个光子，这个光子又蜕变成一个正电子-电子对（见图89）。也还有另一种可能性，即这个被发射出来的光子形成一个μ子-反μ子对，它比当初的电子对要重。此外，当μ子发射一个光子时，如果这个光子产生一个正电子-电子对，这一对要比当初的μ子对轻，而如果产生一个μ子-反μ子对，它会有同样的质量。量子电动力学能够精确地描述μ子的所有的电性质，就象它描述电子一样。

⑦这个讲座之后，又发现有证据表明存在着一种质量非常高的夸克——t夸克，其质量约为40 000百万电子伏。

⑧爱因斯坦和其他一些人曾试图将万有引力理论和电动力学统一起来。这两个理论都只是经典近似，换句话说，他们都不对。这两个理论都没有我们今天认为是必不可少的振幅结构。

附在校样上的注释　**1984年11月**

这个讲座之后，在实验中又观测到一些可疑的事件，由此可能很快会发现一些过去想象不到的（因而是这个讲座中未提及的）新粒子和新现象。

附在校样上的注释　**1985年4月**

上面提及的那些“可疑事件”现在看来是虚惊一场。到你阅读这本书时，情况无疑还会有变化。物理学中事情变化之快往往超过书籍出版的速度。

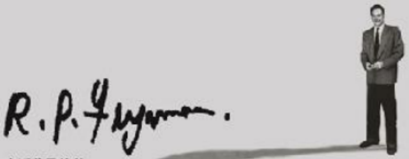
THE CHARACTER OF PHYSICAL LAW

物理定律的本性

Richard P Feynman

［美］R·P·费曼/著　关　洪/译

R·P·费曼（1918－1988）出生在纽约市的法洛克维，1942年在普林斯顿大学获得博士学位。在第二次世界大战期间，他对发展原子弹做出过重要贡献。战后费曼曾先后在康奈尔大学和加州理工学院教书。1965年，他因量子电动力学方面的研究荣获诺贝尔物理学奖。除了作为一个物理学家外，费曼在不同时期还曾是故事大王、艺术家、鼓手和密码破译专家。



走近费曼丛书

CS | 湖南科学技术出版社

版权信息

物理定律的本性

书名原文: The Character of Physical Law

作者：(美) R·P·费曼

译者：关洪

ISBN：9787535772398

责任编辑：吴炜 陈刚

湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
第一章 引力定律——物理定律的一个例子
第二章 数学同物理学的关系
第三章 伟大的守恒定律
第四章 物理定律中的对称性
第五章 过去与未来的区分
第六章 概率和不确定性——对自然界的量子力学观点
第七章 寻找新定律
译后记
附录费曼小传
- 少年时代
- 求学历程
- 战争时期
- 现代量子理论的建立
- 对科学和教育的贡献
- 不息探索的一生

参考文献

第一章　引力定律——物理定律的一个例子

奇怪的是，每当我偶尔被请去一处正式场合演奏邦戈鼓的时候，主持人好像从来也不觉得有必要提到我还会做理论物理。我相信，这也许是由于我们尊重艺术甚于尊重科学的缘故吧。文艺复兴时期的艺术家们说，人们主要关心的应该是人文方面的东西，而世界上还有各种各样有趣的东西。即使是艺术家也会欣赏日落和海浪，以及群星划过天空的运行。那么，我们也有理由不时谈论其他的事物。当我们注视这些事物的时候，我们从对它们的观察直接感受到美学上的愉悦。在自然界的各种现象之间，也存在着肉眼看不到的，而只能用分析的眼光看到的节奏和样式，我们正是把这些节奏和样式称为物理定律。我要在这一系列的讲座里讨论的就是这些物理定律的一般本性；如果你明白了，就达到了另一个层次，一个比那些定律本身更高的层次。我确实把自然界当做通过缜密分析而得到的一种结果，但我在这里主要想讲的只是自然界最普遍的、笼统的性质。

噢，这样的一个话题会倾向于变得太哲学化了，因为它变得那么普遍，当一个人谈到这样一些普遍性的东西的时候，每一个人都能够听懂。他讲的这个话题就会被认为是具有某种深刻的哲学意义了。而我更喜欢具体一些，并且我喜欢以一种纯正的而不是含糊的方式来理解。因而在我的这第一次演讲里，我尝试给出物理定律的一个例子，而不是仅仅谈论普遍性，使得你们至少了解关于我在普遍讲述的事物的一个例子。接下来我将反复地运用这个例子来作为例证，这样做有助于得出一种实在的认识，不然的话就会变得太抽象了。我选择了引力理论，引力现象的物理定律作为我的具体例子。我不知道为什么我会选择引力。事实上它是最先发现的那些伟大定律当中的一个，而它也有一段有趣的历史。你会说，“是的，不过那是一个古老的话题了，而我想听听关于一门现代科学的东西。”更新近的东西，也许不一定是更现代的。现代科学是精确地按照引力定律发现的同一传统建立起来的。而我们会谈到的只是一些新近的发现。我一点也不觉得同你们讲引力定律有什么不好，因为在讲到它的历史和方法以及它被发现的特征和它的性质的时候，我是完全按照现代的方式来讲的。

引力定律被称为“人类头脑所能达到的最伟大的推广”，而你们已经从我的介绍里猜想得到，比起能够遵从像这条引力定律那样优美而简单的定律的奇妙的自然界来说，我对人类头脑并不是那么感兴趣的。因此，我们主要集中讨论的不是我们有多么聪明去发现它，而是自然界有多么聪明去设置这样一条定律。

引力定律，或者万有引力定律，说的是两个物体彼此施加一种力，其大小同两个物体间的距离的平方成反比，并且同两者质量的乘积成正比。我们可以运用数学把这条伟大的定律用以下的公式写出来：

$$F = G\frac{mm'}{r^2}$$

这道公式的意思是：力的大小等于某一常数乘上两者质量的乘积，除以距离的平方。好了，如果我再指出说，一个物体以产生加速度的方式来对一个力做出反应；或者说同它的质量呈反比地每秒改变它的速度；或者说如果它的质量越小，则其速度变化越大，即与质量成反比；那么我就已经说出了关于引力定律所需要讲的一切了。现在我知道你们不都是数学家，你们不能立即看出来从这两句说明会得到的所有结果，因此我在这里要做的是简要地告诉你们发现这一定律的故事，它有一些什么样的结果，这一发现给了科学的历史以什么样的影响，在这样的一条定律的背后留下了什么样的一类奥秘，这涉及爱因斯坦后来所做的一些改进以及可能还有它同物理学里其他定律的关系。

这件事的历史，简单说来是这样的。古人早就发现了各个行星看来是在天空中运行的，并且下结论说各个行星包括地球都是都是环绕着太阳运行的[1]。这种早期做出了的贡献在被人们长久遗忘之后，又由哥白尼独立发现。那么，要研究的下一个问题就是：它们是以怎么样的精确形式环绕太阳运行的，就是说，它们在做的是怎么样的一种精确的运动？它们是以太阳为圆心而运动的，还是沿着别种曲线运行的呢？它们运动得有多快？如此等等。经过了漫长的日子才做出这样的发现。在哥白尼之后的岁月，是对于行星事实上是同地球一起环绕太阳运行，还是地球处于宇宙的中心等问题展开激烈争论的年代。后来有一个名叫第谷·布拉埃的人[2]发展了一种方法来回答这个问题。他想到一个可能是很好的主意：非常非常仔细地观察，把天空中出现的各个行星的位置精确地记录下来，然后就可以根据这些资料，把各种不同的理论一一区分开来了。这正是跨入现代科学的钥匙，它正是对自然界理解的真正开始——这就是观察事物、详尽记录，并且希望如此得到的资料会成为检验这样或那样的理论解释的线索的概念。于是，第谷这位在哥本哈根附近拥有一个岛屿的富有地主，在他的岛上装设了一些指向特定方位的巨大的环状黄铜器械，并且夜复一夜地记录各个行星的位置。只有通过这样艰苦的工作，我们才能够发现得到什么东西。

当收集好了所有这些资料之后，第谷把它们传到了开普勒手上，后者就尝试据此分析各个行星环绕着太阳做的是什么样的运动。而他用尝试和纠错的方法来做这件事。他一度认为他已经找到了规律；他设想各个行星都沿着一些圆形轨道环绕太阳运行，而太阳则不在圆心上。那时候开普勒审视着一颗行星的资料，我想那是火星，发现它的位置偏离了

8弧分[3]，而他断定第谷·布拉埃的观察不可能有这么大的误差，因而他原来的想法不是正确的答案。就这样，由于实验的精确度，使他能够前进到下一次尝试，并且终于发现了三件事。

第一，他发现了各个行星沿着椭圆轨道绕太阳运行，而太阳则处于这些椭圆的一个焦点上。所有艺术家都晓得椭圆这种曲线，因为它是一个按照透视法压扁了的圆。孩子们也知道椭圆，因为有人告诉他们说，如果你在一段线绳上套上一个小环，把线绳的两端分别固定好，然后把一支铅笔穿进小环里，把线绳绷紧滑动，就可以画出一个椭圆（图1）。

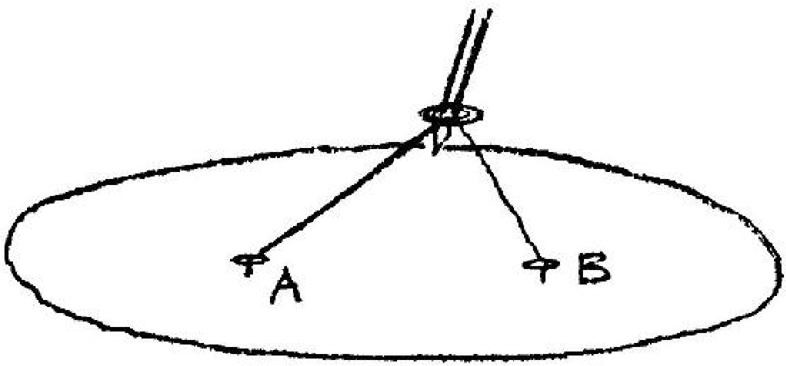


图1

这样的两个固定点A和B就是椭圆的两个焦点。一颗行星环绕太阳的轨道，就是一个以太阳为一个焦点的椭圆。下一个问题是：在沿着椭圆运行的时候，行星是怎样行进的？当它靠近太阳的时候，它会走得快一些吗？当它远离太阳的时候，它会走得慢一些吗？开普勒也找到了这些问题的答案（图2）。

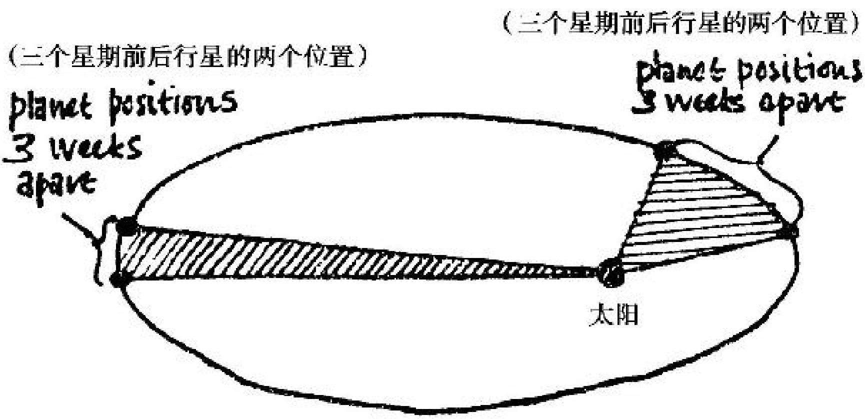


图2

他发现，如果你隔开某一给定的时间间隔，比方说隔开三星期，先后记下一颗行星的两个位置；然后再在这颗行星轨道的另一处，隔开同样的三个星期，先后记下它的两个位置。分别画出从太阳到行星的几个位置的连线（这种连线的专门名词叫做“矢径”），你会看到，不论在行星轨道的什么地方，被行星轨道和通过隔开三个星期前后行星位置所画的两条连线所包围的面积是相同的。因而，为了精确地扫过相同的面积，行星在靠近太阳时必定要走得快些，在离开太阳较远时必定要走得慢些。

几年之后，开普勒发现了第三条规则，这条规则不是仅仅涉及单个行星环绕太阳的运动，而是关系到不同行星轨道运动的联系。它说的是，行星环绕太阳1周的时间，是同它轨道的大小相关的，并且各个行星环绕太阳1周的时间之比，等于其轨道大小的立方的平方根之比；这里说的轨道大小，指的是横跨轨道椭圆的最长一条直径。这样，开普勒就有了三条定律，总括起来可以说成是：行星的轨道形成一个椭圆；和在相等时间内扫过相等的面积；以及行星环绕太阳一周的时间正比于轨道大小的二分之三次方，即为轨道大小的立方的平方根。开普勒的这三条定律给出了各个行星环绕太阳的运动的完整描述。

下一个问题是：是什么使得各个行星环绕太阳运行？在开普勒那个时代，有些人回答这个问题说，有一些天使躲在各个行星的背后，拍打着他们的翅膀，就这样推动着那些行星沿着轨道运行。你们将会看到，这个答案同真实情况差得不太远。惟一的差别只在于那些天使处在一个不同的方向上，而且他们的翅膀是向内侧扇动的。

与此同时，伽利略正在研究着手头的普通物体在地面上的运动规律。在研究这些定律的过程中，他还做了观察诸如球体是如何沿着斜面下滑，以及单摆是如何往复摆动等的实验。伽利略发现了一条叫做惯性原理的伟大原理，它说的是：如果一个没有受到外来影响的物体以某一确定的速度沿着一条直线前进，它就将永远以同一速度沿着同一直线行进。对于曾经尝试使一个球体永远滚动下去的任何人，听到这句话都会不相信；但是，如果满足了上述理想化条件的话，如果不存在诸如与地板的摩擦等外来影响的话，球体确实会以一种均匀的速度永远行进下去。

下一步是由牛顿迈出的，他讨论了这样的问题：“当物体不沿直线前进的时候发生了什么事？”他的回答是这样的：需要有一种力来以不同的方式改变物体的速度。例如，如果你沿着一个球体运动的方向推它的话，它就会加速。如果你发现它的运动方向改变了的话，它一定受到了侧向的力。力是以其两种效应的乘积来量度的。在一段短小的时间间隔里它的速度改变了多少，那叫做加速度；加速度乘上一个物体的叫做质量的系数，即是它的惯性系数，其乘积就等于力。我们可以对此进行测量。例如，如果一个人把一块石子绑在一根绳子的末端，并且把它在头顶上甩开转起来，这个人就会感觉到要拉住绳子。这里的原因是，虽然石块沿着圆周的速率没有变化，但它的方向时刻在改变；必定要有一个

持续向里面拉住它的力，而这个力是与其质量成正比的。因此，假如我们取来两个不同的物体，先甩起第一个在头顶上转圈，再甩起第二个、以相同的速率转圈，我们测量在第二种情况下的力，就会发现第二次的力的大小同第一次相比，等于两个物体质量之比。这是通过改变物体速率所需要的力来测量其质量的一种方法。牛顿从这里看到了，举一个简单的例子，如果一颗行星沿着圆形轨道绕太阳运行，不需要任何力使它沿侧向即切线方向行进，假如完全不受力，它就会只靠惯性一直向前行进。但事实上行星并没有一直向前进，稍过一会儿它发现自己不能够按照假若完全没有受力时的路径前进，而是要倾向于朝太阳坠落（图3）。换句话说，行星的速度，它的运动轨道，已经朝向太阳偏折。因而，天使们要做的事，只是时时刻刻朝向太阳拍打他们的翅膀。

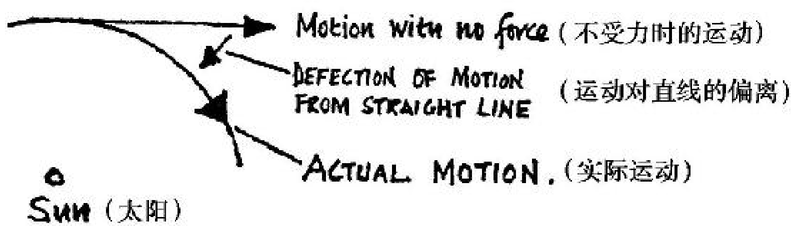


图3

然而，我们不知道有什么理由，使得行星要保持沿着直线的运动。为什么物体永远要凭惯性向前进，我们从来没有为此找到过什么理由。惯性定律没有什么已知的起源。虽然天使们是不存在的，而行星的运动仍然持续不停，但为了得到朝向太阳的下落效果，我们确实需要一种力。现在变得清楚了，力的起源就是朝向太阳。事实上，牛顿能够说明，矢径在相等的时间里扫过相等的面积这一规律，乃是速度的所有变化都是精确地指向太阳这一简单观念的直接结果，即使在椭圆轨道的情况下也是如此。在下一讲里，我将会向你们详细说明这是怎么回事。

牛顿从这条定律确认了力是朝向太阳这一观念，并且从不同行星的运行周期是怎样随着它们到太阳的距离而变化的规律，就有可能确定力以什么样的形式随距离而减弱。他能够确定，力必定同距离的平方成反比。

到这里为止，牛顿还没有说出什么自己的话，因为他只是陈述了开普勒用不同的语言讲过了的两件事。其中之一完全等价于力是朝向太阳的陈述，另一件事则完全等价于力与距离的平方成反比。

然而，人们已经用望远镜看到了木星周围有几颗卫星环绕着木星运行，看起来就像一个小型的太阳系，好比那些卫星被木星吸引着一样。月球被地球吸引过去，环绕地球运行，也是以同一方式被吸引的。看起来好像每一个物体都被每一个别的物体所吸引，因而下一个陈述就是把这一想法推广，说每一个物体都吸引每一个其他物体。如果是那样的

话，地球必定拉住月球，就像太阳拉住地球一样。然而，人们已经知道地球正在拉住各种各样的物体——因为你们现在都紧贴在椅子上坐着，尽管你很想能够自由自在地在空中飘浮。地面上的物体被拉住这件事，已经作为重力现象而众所周知了，而牛顿的想法则是，也许使月球保持在轨道上的引力与使物体拉向地面的重力是一回事。

容易算出月球在1秒的时间里朝向地球落下多远，因为你知道了它的轨道的大小，知道了月球用1个月的时间环绕地球1周；如果你算出了月球在1秒的时间里走多远，你就能算出月球的圆形轨道在1秒的时间里，比起如果它不是走它确实走过的圆周而走的是直线时要落下多少。这一距离是二十分之一英寸（1英寸＝2.54厘米，全书同）。月球离开地球的中心的距离，是在地面上的我们离开地球中心的距离的六十倍；我们到地心的距离是4 000英里（1英里＝1.069千米，全书同），因而月球到地心的距离是240 000英里。因此，如果反平方定律是对的话，地面上的一个物体应当在1秒的时间里下落（1/20）英寸×（3 600）（即60的平方）[4]，因为按照反平方定律，从地面到月球，引力减弱到（60×60）分之一。（1/20）英寸×（3 600）大约是16英尺（1英尺＝0.3048米，全书同），而从伽利略的测量已经知道，在地面上的物体在头1秒内落下16英尺。因而，这意味着牛顿的路子走对了，现在已经往前进了，因为已经将月球的轨道运行周期和它同地球的距离这一新的事实，同在地球表面上一个物体在1秒内落下多远这一先前毫无关联的事实联系起来了。这是一场戏剧性的检验，而一切都很顺利。

牛顿再往前进，又做出了许多其他预言。他能够计算出，如果力满足反平方定律的话，轨道的形状应当是什么样子；并且他发现了那的确是一个椭圆——他就这样做出了他的推广。此外，几种新现象有了清楚的解释。其中之一是潮汐现象。潮汐是由于月球对地球和它表面的水体的吸引而产生的。在从前对潮汐的有些考虑遇到了困难，如果那是由于月球对于海水的吸引使得在正对着月球的部位海水要比周围高出来的话，那么应该是每天只在正对着月球的部位有一次海潮（图4），但实际上我们知道差不多每12小时有一次潮汐，也就是一天两次。还有另一种派别的想法，导致一种别的结论。他们的理论是说，受月球吸引的是地球，使得它离开水体，这样就会在背向月球的那一面形成涨潮。牛顿实际上是第一个认识到在潮汐现象中发生了什么事的人；他认识到，在同一距离上，月球吸引地球和吸引海水的力是一样的，但同刚性的地球比起来，处在y处的海水比较接近月球，而在x处的海水则比较远离月球。于是，比起地球来说，在y处的海水受到朝向月球的较强的吸引，而在x处的海水则受到朝向月球的较弱的吸引，因而这两种图像的结合就产生了一天两次的潮汐。实际上地球也玩着同月球一样的把戏，它也环绕着一个圆周运行。月球作用于地球的力被平衡了，但是被什么东西平衡了？那是由于正如月球沿着圆周运行来平衡所受到地球的力一样，地球也沿着一个小的圆周在运行。这个小圆的圆心处在地球内部的某处。地球亦沿着这个圆周运行来平衡所受到的月球的力。地球和月球都环绕着一个共同的中心运行，使得地球所受到的力得以平衡；但在x处的海水受到月球的吸引较弱，而在y处的海水受到月球的吸引较强，就

使得海水在两侧都鼓涨起来了。这样就说明了潮汐发生的次数，事实上是一天里面有两次。一大批其他的事情也变得清楚了：地球怎么会是圆的，那是因为什么东西都被强拉进去；地球又怎么会不那么圆呢，那是因为它在自转，在外侧的部位就被甩出去一点了，而它则达到了平衡；太阳和月球怎么会是圆的呢，如此等等。

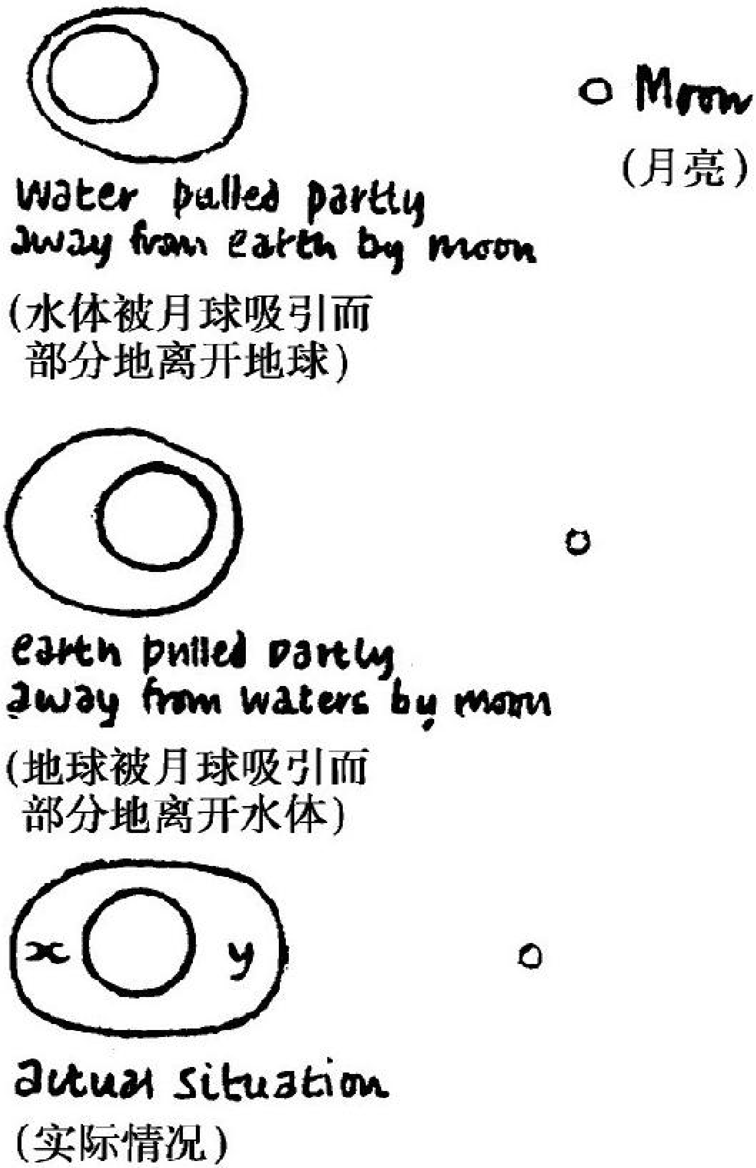


图4

在科学的发展和测量做得更精确的进程中，对牛顿定律的检验变得

越来越严厉，最早的一些精细检验，包括有对木星的几个卫星的观察。通过对这些卫星运行的长时间的精确观察，我们就能够检查根据牛顿的原理所做出的种种结论而发现情况并非如此。木星的几个卫星看起来有时候比根据牛顿定律计算出来的时刻早到八分钟，有时候则迟到八分钟。并且还注意到了这些卫星比预期时刻要早到的情况，都发生在木星正朝向地球接近的进程中，而卫星比预期时刻要迟到的情况，都是木星正在远离地球之中，一种相当古怪的巧合。罗默先生[5]坚信万有引力定律，他得到一个有趣的结论说，光从木星的卫星传到地球是需要一段时间的。当我们看到这些卫星的时候，看到的不是它们当时所处的位置，而是它们在光传到地球上的这一段时间之前所在的位置。当木星向我们接近的时候，它发出的光传到我们这里的时间就要短一些，当木星正在离开我们的时候，光传到我们这里的时间就要长一些，因而罗默必须依据它们或者早到或者迟到的事实来校正那些不同时间差的观察数据。他用这种方法就能够测定光的速度。这是光并不是一种即时传播的物质的第一个证据。

我向你们讲到这一特别的事例，是因为它说明了当一条定律是正确的时候，它就能够被用来发现另一条定律。如果我们坚信一条定律，那么如若出现了一些看来是错误的东西的时候，正是向我们提示了另一种现象的存在。如果我们不知道有什么引力定律，那么我们本来会经过比较长的时间才能够发现光的速度，因为那样我们就不会知道从木星的卫星能够看出什么来。这一过程已经发展成为一场包含许多发现的雪崩，每一种新的发现都提供了做出更多的发现的手段，而这正是直到如今的400年内这一场大雪崩的连续过程的开端，而我们至今仍然以高速继续着这场雪崩。

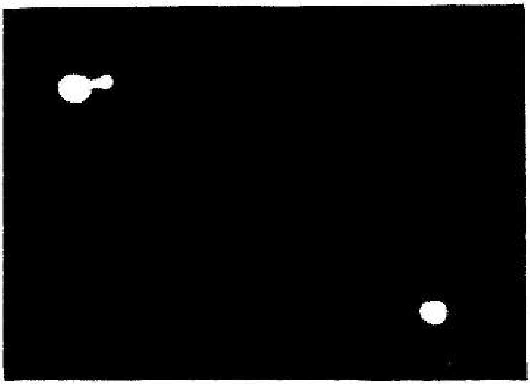
另一个问题接着出现了——各个行星不应当真正沿着椭圆轨道运行，因为根据牛顿定律，它们不仅受到太阳的吸引，而且也受到其他每一颗行星的一份微弱的拉动，那仅仅是一点点吸引，但那一点点也是起作用的，会使得行星的运行发生一点点变化。那时候已经知道有木星，土星和天王星这几颗大行星，能够计算出由于受到其他每一个行星的拉动而使它们的运行轨道比开普勒的理想椭圆行星轨道有多么微小的不同。在做完了一切计算和观察之后，看出来木星和土星的运行是符合计算结果的，但天王星的运行则有点不对头了。这是从牛顿定律发现未知的东西的又一次机会：但要鼓足勇气！有两个人，亚当斯和勒维尔[6]在差不多完全相同的时间里，分别独立地进行了这些计算，并且提出说天王星运行的不规则性是由于受到了一颗尚未看见的行星的影响。于是他们写信给他们各自熟知的天文台说："把你们的望远镜转过来，往那里看，你们就会发现一颗新的行星。"其中一座天文台回答说："真好笑，有个家伙坐在那里摆弄着铅笔和纸张，就以为他能够告诉我们在什么地方可以找到某个新的行星了。"而另一座天文台则做了不同的处理，他们就因此而发现了海王星！

更近一些，在二十世纪初年，又看出了水星的运行不是那么完全对的。这就引起了一大堆麻烦，一直未能得到解释，直到爱因斯坦证明，

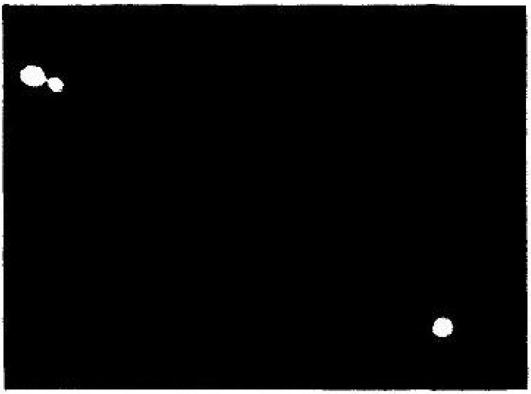
牛顿的诸定律有一点不对头，必须对它们进行修改。

这里的问题是，牛顿定律的有效范围可以延伸得多远？它适用于太阳系之外吗？在图版1里我显示了万有引力定律适用于超出太阳系的更大尺度的证据。这里是一对叫做双星的一系列三幅照片。在照片上幸好有第三颗恒星，使得你可以看出那对双星真的是在旋转，而不是在天文观测照片上常常会发生的那样，仅仅是把照片的框子转过一个角度。这两颗恒星确实在绕着圈子运行，你可以在图5上看到它们形成的轨道。很明显，它们是在互相吸引，并且按照预期的方式，在一个椭圆轨道上运行。图上表示的是其沿着时针方向运行的不同时刻的各个接连的位置。如果还没有注意到其中一个细节的话，你看到这幅图会很高兴；但如果你注意到了，会发现轨道的中心并不处在椭圆的一个焦点之上，而是很有点偏离。是不是那些定律有麻烦了？不，上帝没有把这一轨道的正面摆给我们看；它倾斜了一个古怪的角度。如果你在一张纸上画好一个椭圆并且标出它的焦点，然后拿起这张纸，从一个特别的角度去看它的投影，你会发现原来那个焦点并不必位于投影图像的焦点处。这是因为轨道在空间中被倾斜了，使得它看起来是那个样子。

距离再远会怎么样？这是两颗恒星之间的力；它还能够适用于比两三倍太阳系直径更远得多的距离吗？在图版2上显示的是由许多恒星聚集而成的一个球状星团，它的直径是太阳系的100　000倍。那个大白斑不是一个实心的白斑，它看起来那样是因为仪器的分辨率不够的缘故，实际上应当有许多像其他恒星一样的非常非常细小的斑点，彼此分得很开，互相并不碰击，每一颗恒星都在这个巨大的球状星系里做贯穿式的或者往复式的运动。它是在天空中最美丽的东西之一；它同海浪和日落一样美丽。物质的这种分布是完全清楚的。把这种星系维系在一起的东西，就是各个恒星互相之间的引力吸引。其中物质的分布和距离的观念，使我们得以粗略地发现在这些恒星之间起作用的力的定律……并且，得出的结果当然是，这种力大概遵从反平方定律。这些计算和测量的精确度无论如何也达不到像在太阳系里那么细致。



1908 年 7 月 21 日

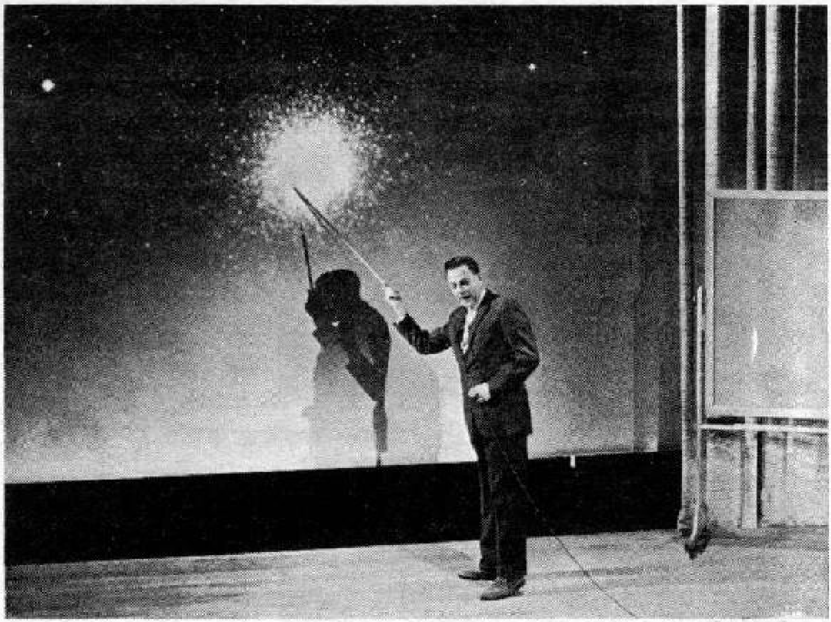


1915 年 9 月

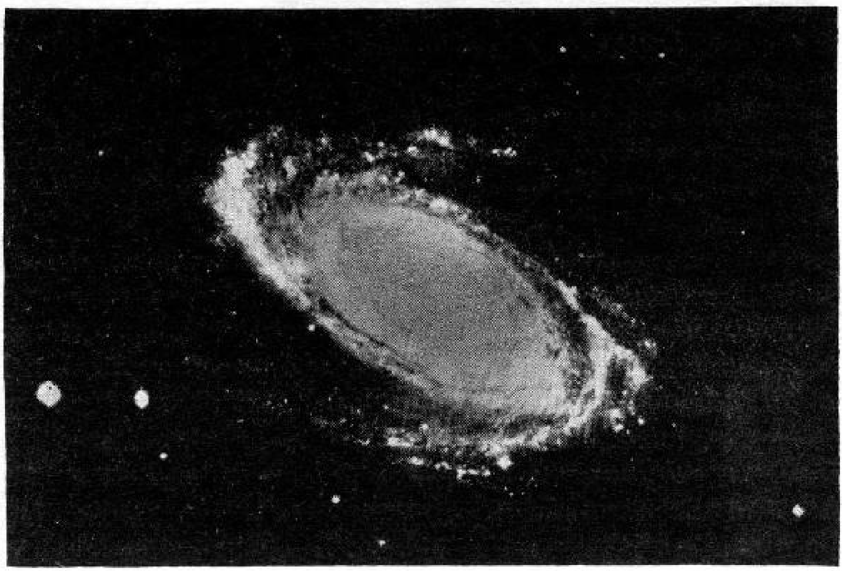


1920 年 7 月 10 日

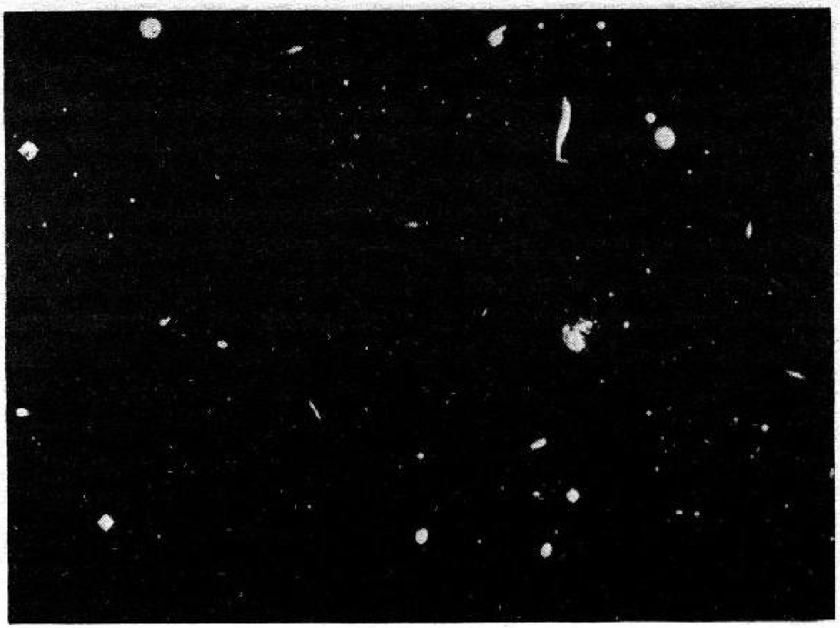
图版1在不同的时间对同一个双星系统拍摄的3张照片



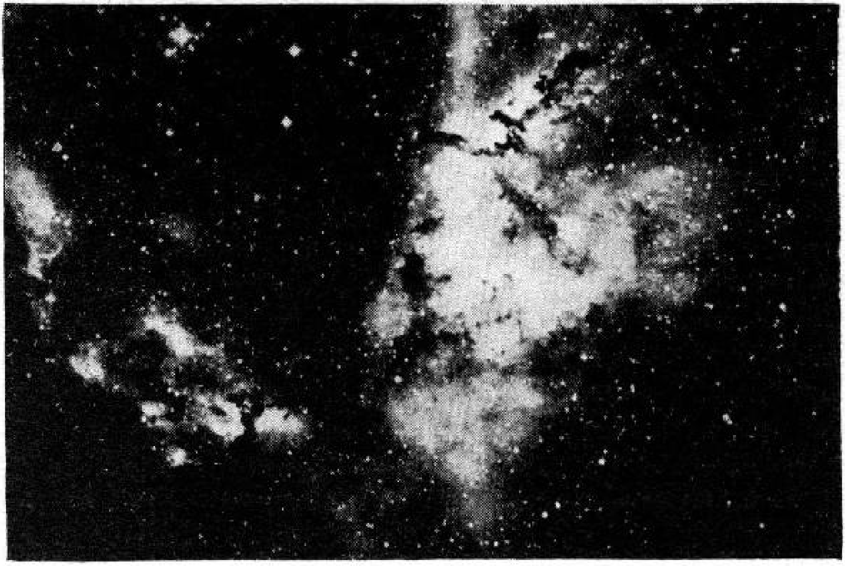
图版2一个球状星团



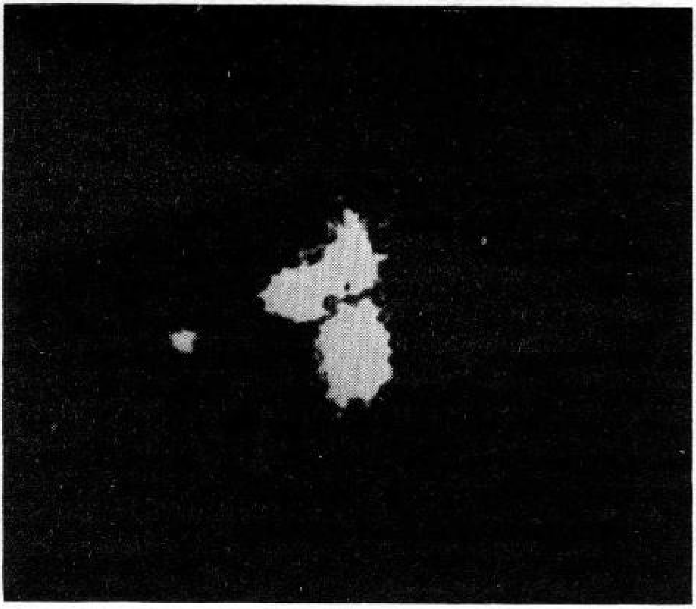
图版3一个螺旋星系



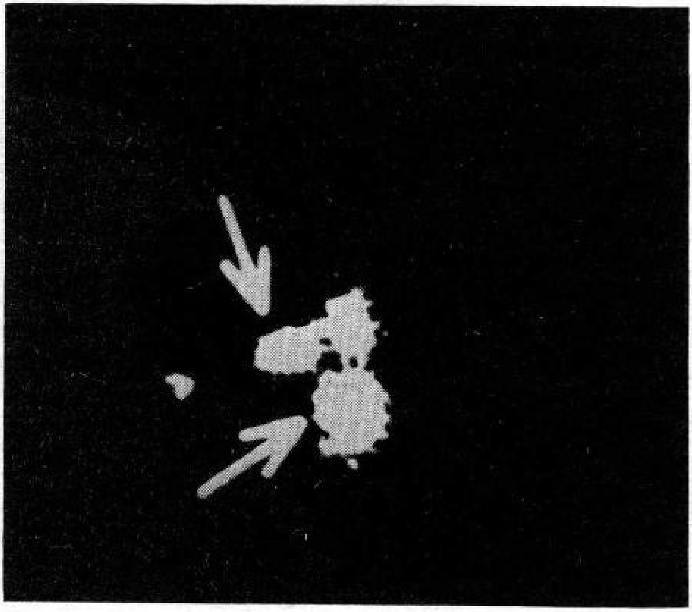
图版4一个星系团



图版5一个气体星云



1947



1954

图版6新星创生的证据

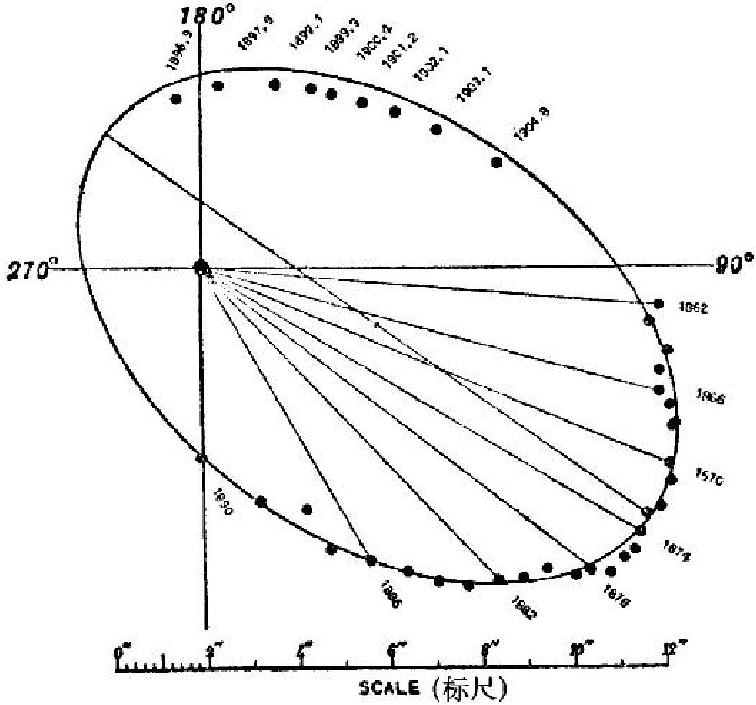


图5

再往前走，引力还可以延伸到更远。那个星团仅仅是在图版3里的那个大星系里的一个针尖似的小点。在这幅图版里显示出一个典型的星系，并且也很清楚的是，它是由某种力维系在一起的，而它的惟一合理的候选者就是引力。当达到这么大的尺度时，我们没有办法去检验那条反平方定律，但看来没有疑问的是，在数目非常巨大的这一大堆恒星中间，引力是一直延伸到这样的距离上的。这些星系的空间跨度有50 000～100 000光年那么远，而从地球到太阳的距离则仅仅是8光秒。在图版4里，给出了引力延伸得更远的证据。这是叫做星系团的东西，它们全都结成一团，就像星团一样；但这一回结成团的各个成员不是个别恒星而是在图版3里显示的那样的大宝贝。

到达这样的距离，大概是宇宙的十分之一，也许是百分之一的大小，这是我们拥有引力延伸得到的直接证据的最远距离。因而地球的引力是无边无际的，虽然你会在有些文章上读到说，存在着一些什么东西是超出了引力场范围之外的。当距离越来越远时，引力按照与距离的平方成反比地逐渐减弱，每一回你把力的强度除以四，你就达到两倍那么远的距离，直到它迷失在其他恒星的强大的引力场中。一颗恒星同它近邻的各个恒星一起，拉拢其他许多恒星以形成星系，然后它们团结在一起，再拉拢其他许多星系，形成了一种模式，即星系团——由星系组成的集团。因而地球的引力场永远也不会完结，但会按照一条精确而细致的定律逐渐消失，也许最终是在宇宙的边沿上。

引力定律与其他许多定律是不同的。它显然对于宇宙的经济收支和运转机制是十分重要的；只要涉及宇宙，引力就在许多地方具有它的实际应用。但是，显得不正常的是，比起物理学里其他一些定律说来，引力定律只有相当少的一些实际应用。这是我找到的一个不正常的例子。顺便说说，要找到任何一件东西，而它没有在某种意义上表现得不正常，那是做不到的。这就是世界的奇妙之处。我想得起来的引力定律知识的应用，只是在地球物理勘探、潮汐预报，以及近期更加现代化的，计算出我们送入轨道的人造卫星和行星探测器的运动等方面；最后，也是一种现代的应用，则是预测出各个行星位置，那些数据对于占星术士是非常有用的，他们要在有关刊物的星象图上发表他们的预言。我们生活在其中的世界真是一个奇怪的世界，在理解自然界上的种种新进展，只是用来延续那已经存在了2 000年的胡言乱语。

我必须指出引力在宇宙的行为中真正起着某种效果的一些重要地方，而其中的一个有趣的效应就是新星的形成。图版5是在我们的银河系里的一个气体星云；它不是由许多颗恒星而只是由气体组成的。其中那些黑色的斑点是气体被压缩即由于自相吸引而收缩的地方。这种过程或许是由某种冲击波开始的，但我们看得到的只是它遗留下来的现象，引力把气体收拾得越来越缩紧，使得原先横冲直撞的气体和尘埃聚集起来并形成球状；当它们继续朝中心坠落的时候，由于坠落产生的热点着了它们，就成为发亮的恒星。在图版6里我们给出了新的恒星诞生的一些证据。

这就是当气体由于引力而高度集中的时候，怎么样产生新星的过程。有时候当恒星发生爆炸，喷出尘埃和气体，而那些尘埃和气体又重新聚集在一起，形成新的恒星——听起来就像一种永无完结的循环过程。

我已经讲到了引力延伸到很远的距离，但牛顿说过，任何东西都吸引着别的任何东西。两个物体真的彼此在吸引吗？我们能不能做出一个直接的试验，而不是仅仅坐等看到各个行星互相吸引呢？卡文迪什[7]使用你在图6中看见的那种设备来做这样的直接试验。他的想法是用一根非常非常细的石英纤维，悬起两端各装了一个小球的一根横杆，然后把两个大的铅球放到小球旁边的位置上，如图所示。因为那些球体的吸引会使得纤维发生轻微的扭转，而在普通物体之间的引力确实是非常非常微弱的。卡文迪什说他的实验是“称量地球的重量”。今天受过了讲究词语的精心教育，我们不会让我们的学生那么说了；我们应当说的是“称量地球的质量”。卡文迪什能够用一种直接的实验测量到力，两个物体的质量以及距离的大小，从而测定了引力常数G。你会说，“是的，但我们在这里遇到同样的情况。我们知道拉力有多大，而且我们知道被拉的物体的质量，并且我们知道我们离开得多么远，但是我们既不知道地球的质量，也不知道引力常数，只知道这几个因素联合起来的效应。”通过测量引力常数，并且知道受到地球拉住的事实，就能够测定地球的质量。

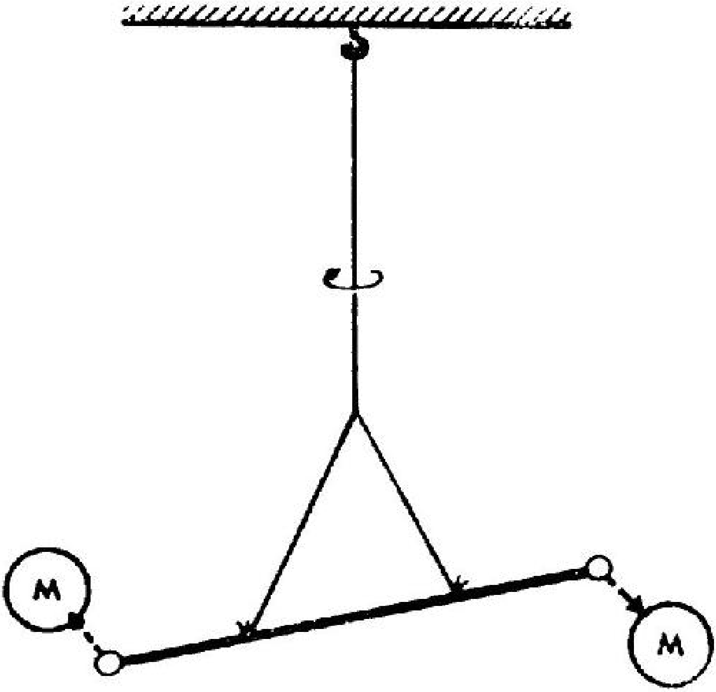


图6

这一实验是对我们所处的球体有多重或者有多大质量的第一次间接的测量。发现这一点是一个惊人的成就，并且我想这就是卡文迪许把他的实验称为“称量地球的重量”，而不是“测定引力方程中的常数”的缘故。他还同时意想不到地称量了太阳以及任何别的东西，因为我们已经以同样的方式了解了太阳的拉力。

检验引力的另一种试验是十分有趣的，这就是拉力是否精确地同质量成正比的问题。如果拉力是精确地正比于质量的话，对于力的反应，即由力所引起的运动速度的改变则是反比于质量的。那就意味着，在引力场中两个不同质量的物体将会以同样的方式改变它们的速度，或者说，在真空中两个不同的物体也将会以同样的方式下落到地面上，而与其质量的大小无关。都将以同样的方式下落到地面上。那就是伽利略在比萨斜塔上所做过的古老实验。举例说，它意味着，在一个人造卫星里面，一个处在内侧的物体环绕地球运行的轨道，就会与一个处在外侧的物体的轨道相同，于是看起来就漂浮在中间了。力精确地同质量成正比，以及对力的反应反比于质量这一事实，就会有这样非常有趣的结果。

它有多精确呢？一个叫做厄缶的人[8]在1909年做了一个实验来测定它的精度；而新近狄克[9]又做了精密得多的实验，测定其精度为一百亿分之一。引力是精确地同质量成正比的。怎么有可能达到这一精度的测量呢？假定你想要测量对太阳的拉力来说是不是这样。你知道太阳正在拉

着我们大家，它也拉着地球，而假定你想要知道这种拉力是否精确地正比于惯性。首先使用檀香木来做实验；再用铅和铜，现在是用聚乙烯来做实验。地球环绕着太阳运行，因而地面上的各种物体都由于其惯性而被往外抛，并且它们被抛出的程度与两者的惯性成正比。但根据引力定律，它们又按照其质量的比例受到太阳的吸引，因而，假若它们被太阳吸引的程度不是同它们由于惯性而被抛出的程度成比例的话，其中一个物体就会被拉向太阳一点，另一个物体则被推开一点；于是，把这样的两个物体悬挂在另一台卡文迪许仪器的石英纤维上的横杆的两端上面，就会发生朝向太阳的扭转。它没有以这样的精确度发生扭转，因而我们知道太阳对两个物体的吸引是同离心效应即惯性精确地成比例的；因此，对一个物体的吸引力是精确地同它的惯性系数成比例的，换句话说，是同它的质量成比例的。

有一件事是特别有意思的。反平方定律再一次出现——例如在电学定律里。电学里也施行着与距离平方成反比的力，这一次是在电荷之间的力，并且人们设想，也许距离的反平方会有某种深刻的意义。从来没有人能够成功地把电力和引力做成是同一个东西的两个不同方面。我们今天的物理学理论，物理学的定律，分成许多不同的分支和部门，它们并不能很好地协调一致。我们还没有那样的一个理论结构，从它能够推导出一切来；我们有的只是几个还不能够很好地完全协调一致的部门。那就是为什么在我的这些讲座中，我不能够告诉你们什么是物理学的定律，而只能谈论各种定律里共同的东西的原因；我们还不清楚那些定律之间有什么联系。但十分奇怪的是，有某些东西在两个不同部门里却是一样的。现在我们再来看看电学的定律。

电力反比于距离的平方而变化，但事情明显是不同的，那就是在电力和引力的强度上有极大的差别。要想从同一个理论推出电力和引力的人，会发现电力要比引力强很多很多，很难相信它们竟会有同样的来源。我怎么能够说一个东西比另一个东西强呢？这取决于你有多少电荷以及你有多少质量。你不能够光凭说“我取这么大的一块东西”来谈论引力有多强，因为那一块的大小是由你选择的。如果我们尝试获得自然界中产生的某种东西——她自己的一种不依赖于单位大小的纯数，完全不依赖于英寸或者年或者我们自己的尺寸——我们就能够以这种方式来讨论。如果我们取一种基本粒子，譬如电子——选择任何别的粒子会给出不同的数值，但为了给出一个概念我们还是选择电子——两个电子是两个基本粒子，它们由于带相同电荷而彼此按照距离的反平方相推斥，同时由于引力而彼此按照距离的反平方相吸引。

问题：引力对电力的比值等于多少？在图7里写出来了。吸引的引力对排斥的电力的比值给出了一个有42位尾巴的数字。好了，这里有一个非常深奥的谜团。这么大得不得了的一个数能够从哪里来呢？假若你真的有了一种理论，能够由此推出这些东西，它们怎么能够以这样一种不相称的形式出现呢？什么样的方程能够有这样的一个解，其中有两类吸引和排斥的力，其强度竟然有如此惊人的比例呢？

人们在其他一些地方已经看到过这样大的比值。例如，他们希望看到另外一个大的数目，而且如果你想要一个大数的话，为什么不取宇宙的直径比上质子的直径呢——令人吃惊不已的是，这个比值也是一个具有42位数字的数。于是有人提出了一个有趣的建议说，电力对引力强度的比值是与宇宙对质子直径的比值相同的。但是宇宙是随时间而膨胀的呀，那么就意味着引力常数是随时间而变化的，虽然那是一种可能性，但还没有证据表明那就是事实。存在着几种不完全的迹象，表示引力常数并不按照那种方式变化。于是，这一惊人的数目还是个谜。

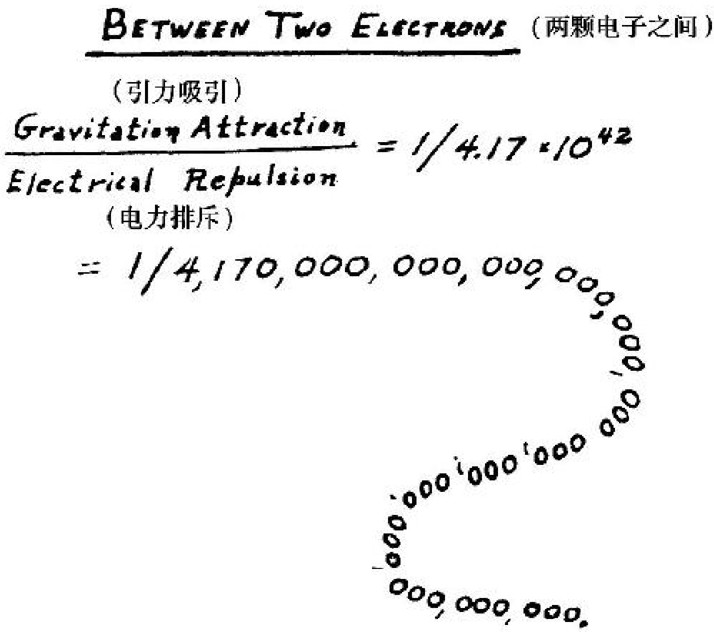


图7

在结束引力理论的时候，我必须再讲两件事。第一件是爱因斯坦要根据他的一些相对性原理来修改引力定律。这些原理中当中第一条是说，距离“x”不能够即时越过，而牛顿的理论则说力是即时传递的。于是，爱因斯坦就必须修改牛顿诸定律了。这些对定律的改动，有一些非常微小的效应。其中之一是说，所有质量都因为受到引力而下落，光具有能量而能量等价于质量。因而也具有质量的光也会在引力场中下落，这就意味着光通过太阳附近时会产生偏折；正是如此。此外，在爱因斯坦的理论里，引力也被稍微改动了，因而相应的定律也改动了那么一点点，改动的大小刚好能够得出在水星运行当中发现了的微小偏差。

最后要讲的是，谈到在微小尺度上的物理定律，我们发现了在微小尺度上物质的行为所遵从的定律与在大尺度上的事物是全然不同的。因而就有了这样的问题，怎么样看在微小尺度上的引力？那叫做引力的量子理论（量子引力理论）。今天还没有引力的量子理论。在建立一个与不确定关系和量子力学基本原理相融洽的量子引力理论方面，人们还没

有获得完全的成功。

你会对我说，“是的，你告诉了我们发生了一些什么事，但什么是引力呢？引力是从哪里来的呢？引力是什么？你告诉我的意思是不是说，一颗行星看着太阳，看它有多远，算出这段距离平方的倒数，然后决定依照那条定律来运行呢？”换句话说，虽然我陈述了那条数学定律，我还没有给出关于其中机制的任何提示。我将会在下一讲“数学同物理学的关系”里讨论这样做的可能性。

在这次讲座里，我愿意在结束的时候强调，引力的某些本性是与我们在讲演中提到的其他定律共同的。首先，它是通过数学来表达的；其他定律也是以这种方式表达的。其次，它不是完全精确的；爱因斯坦要去改动它，而我们知道它还不是那么绝对正确的，因为我们仍然在建立它的量子理论。对我们所有的其他定律来说都是一样的——他们不是完全精确的。总是有一条神秘的边界，总是有一处我们仍然可以在那里瞎碰瞎闹的地方。这可能是也可能不是大自然的一种性质，但这一点肯定是我们今天晓得的所有定律的共同之处。也许这只是因为我们无知的缘故吧。

但给我们印象最深的事实是，引力是简单的，能够简单地把其中的原理全部陈述出来，而不留下可以让任何人改变定律的观念的任何模糊之处。它是简单的，因而它是美的。它的简单是在它的模式上。我不是说它的简单是在它的作用上——各个不同行星的运动以及一个行星对另一个的摄动，可以十分复杂以至于算不出来，而追踪在一个球状星团里的所有那些恒星在怎么样运动，则是远在我们能力之外的。在它的作用方面它是复杂的，但支配着整个事情的基本模式或者理论体系则是简单的。这是我们的所有定律的共同之处；它们原本都是简单的东西，尽管它们的实际作用却是复杂的。

最后谈到引力的普遍性以及引力延伸到如此遥远距离的事实。牛顿在他的脑子里关心的是太阳系，却能够预言在卡文迪许的一个实验里会得到什么结果；而卡文迪许的那个太阳系的小小模型，那个两个小球相互吸引的模型则延伸到一千亿倍，变成了太阳系。再放大一千亿倍，我们再次得到一些彼此精确地按照同一定律相互吸引的许多星系。大自然只用了一些最长的丝线来编织她的花样，使得在她的织物上的每一片段都体现了整块锦缎的组织原则。

第二章　数学同物理学的关系

在考虑数学的应用和物理学的时候，我们很自然地想到在复杂的情况下涉及大的数目时，数学就会有用。例如，在生物学里，病毒对细菌的作用是非数学化的。如果你在一台显微镜下面观察它，一个左摇右晃的病毒在那奇形怪状的细菌（它们有各种各样的形状）上找到了一个切入点，可能把它的DNA注入进去，也可能不注进去。如果我们做了千千万万次关于病毒和细菌的实验，那么我们就能够通过取平均来了解得到关于病毒的大量知识。我们在平均时可以运用数学，看看病毒是否在细菌体内生长发育，产生了什么新变异以及以多大的百分比发生了变异；然后我们就能够研究遗传学，研究各种突变等等现象了。

再举一个更加平凡的例子，设想有一块很大的板子，用来做下跳棋的棋盘。任何单独一步棋的实际操作都不是数学化的，或者说它在数学上是非常简单的。但你能想得到，在一块那么大的棋盘上，摆上了许多的棋子，只有进行深刻的推理，才会分析出哪些是最佳的几着、好的几着或者坏的几着棋，这种推理里又包含了有人事先准备并且深思熟虑的结果。于是这就变得数学化，包括抽象的推理了。另一个例子是计算机里面的开关电路。如果你只有一个开关，无论它是开或者是关，这里没有什么特别数学化的地方，虽然数学家们喜欢从这里出发来展开他们的数学。但如果有许多个开关再加上连线的互相连接，要想象出这样一个巨大的系统会怎样动作，就确实需要数学了。

在讨论复杂情况的各个细节的现象，找出游戏的基本规则时，我喜欢立即说数学在物理学中有极大的应用。那是如果我仅仅谈到数学同物理学的关系的时候，我会把我的大部分时间用来谈论的东西。但由于这是关于物理定律的本性的一系列讲座的一部分，我不会有时间去讨论在复杂情况下发生了什么事，而是立即转到另一个话题，即那些基本定律的本性。

如果我们回到我们的跳棋比赛，其基本的定律是棋子走动的规则。数学可以应用到复杂的情况，想象出在给定的形势下，走哪一着棋是最好的。但对于那些基本定律的简单本性来说，只需要很少的数学。那些下棋的规则可以由棋友们用话语简单地说出来。

关于物理学的一件怪事是，我们仍然需要用数学来表达它的基本定律。我将会举出两个例子，在其中一个例子里我们的确不需要数学，而在另一个例子里则确实需要数学。第一，物理学里有一条定律叫做法拉第定律，它说的是在电解过程中淀积的材料的数量，正比于电流和通电的时间。那意味着淀积下来的材料的数量正比于通过系统的电荷。这听起来十分数学化，但实际发生的只是在导线里通过的电子，每一颗都携带着一份电荷。举一个特别的例子，可能每淀积一个原子需要一颗电子

的传递，因而淀积的原子的数目就必定等于通过的电子的数目，从而正比于导线中流过的电荷。你们看，那条看起来像是用数学表达的定律，其实并没有什么高深的基础，并不需要什么真正的数学知识。我想，为了使每一个原子淀积下来需要有一个电子流过，这本身亦是数学，不过不是我正在这里谈论的那种数学。

另一方面，拿牛顿的引力定律来说，我在上一次讲过了它的各个方面。我向你们给出过它的公式：

$$F=G\frac{mm'}{r^2}$$

只是使你们得到印象，看到运用一些数学符号能够多么快地传达信息。我说过力正比于两个物体质量的乘积，并且反比于它们之间距离的平方；而且物体对力的反应是改变它们的速度，即改变它们的运动，改变的快慢与力成正比且与它们的质量成反比。那些都是话语，对吧。我不一定要写出公式。但无论怎样它都是一种数学，而且我们总是为这怎么能够是一条基本定律而感到惊讶。行星在做些什么？它是不是注视着太阳，看看它离太阳有多远，然后在它内部的加法机械上计算出距离平方的倒数，这样来告诉它要怎么样运动呢？肯定不存在关于引力机制的解释！你会想看得更深入一些，而已经有些人试图看得更深入了。牛顿原先就受到过对他的理论的质问——“但它并不意味着什么——它没有告诉我们什么东西”，牛顿说，“它告诉你们它怎样运动。那就够了。我已经告诉你们它是怎样运动，而不是它为什么那样运动。”但是，人们常常因为找不到一种机制而感到不满意，而我则愿意在已经发明的种种理论当中，找一种你们会想要的那种类型的理论来讲解。这一理论提出引力效应是大数目的作用的结果，那就能够说明它为什么是数学化的。

假设世界上到处都存在着许许多多粒子，它们以极高的速率飞过我们身旁。它们均匀地从四面八方袭来，一般仅仅是在我们身边擦过，只是偶尔会击中我们的身体。我们和太阳对它们说来实际上都是透明的。我说的是实际上而不是完全的透明，因为有一些粒子是会撞击到我们或者太阳上面的。那么，看看会发生什么样的情况（图8）。

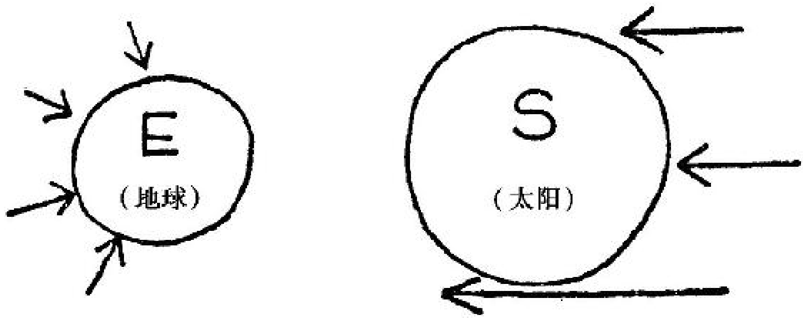


图8

图中的S是太阳，E是地球。假如没有太阳在那里，粒子就会在各个方向上撞击地球，叮叮咚咚或者乒乒乓乓地击中的少数粒子，给地球以一些轻微的冲击。这不会令地球在任何特定的方向上摇摆，因为如果在一个方向上有这么多的粒子撞击，就会有同样多的粒子在相反的方向上撞击地球，例如地球顶部和底部受到的冲击是一样大的。然而，当有一个太阳在那里的时候，来自那个方向的粒子被太阳挡住了，因为那些击中太阳的粒子是不能够穿透太阳的。因而从太阳那边飞向地球的粒子由于遇到了太阳这个障碍，就会少于来自另一边的粒子的数目。容易看出，太阳离得越远，它所挡住的那部分粒子在从所有可能方向飞来的粒子中所占的比例就越小。太阳离得较远，看起来它就变小了——事实上是按照距离平方的反比而变小的。因此会有一种冲力作用到地球上，使它趋向太阳，这种冲力的大小是与距离的平方成反比的。而这种效应则是由于许许多多简单的动作，只是从所有方向上一次又一次地撞击而导致的结果。因此，那难以理解的数学关系就被这样大大地简化了，因为这里的基本动作要比计算距离平方的倒数简单得多。在这个方案里，那些粒子的反弹就这样执行了所需要的计算。

这一方案只有一个毛病，那就是由于别的一些理由，它是行不通的。你建立的每一种理论都要对它的所有结果进行分析，看看它还做出了一些什么样的预言。而这一方案的确做出了别的一些预言。如果地球在运动着，在它前面就会比后面受到更多粒子的撞击。（如果你在雨中跑步，从前面打到你脸上的雨点要比从背面打到你脑后的雨点多，因为你是在跑入雨幕之中。）那么，如果地球是在运动着，它就迎头碰着在前面朝着它奔来的那些粒子，同时逃离着在后面追赶着它的那些粒子。因而从地球前面迎击它的粒子就要比从后面赶上的多，就会产生一种阻碍任何运动的力。这种力将会减缓地球在它的轨道上的运动，那样它就肯定不能够维持至少三十亿到四十亿年一直环绕着太阳的运行了。因此那种理论就垮台了。你会说，“好了，它是一个好理论，而我靠着它一时摆脱了神秘的数学。或许我能够发明出一种更好的理论。”你也许能行，但谁也不知道结局如何。但是，从牛顿那时候起直到今天，没有一个人能够为隐藏在这条定律后面的数学机制发明出另一种理论描述，而不仅

仅是把同样一些东西重复一遍，或者把数学弄得更复杂，或者是预言出某些错误的现象。因此，今天除了引力定律的数学形式之外，没有什么试图解释引力机制的理论模型。

如果只有引力定律具有这样的本性，那就是一件颇为有趣的和令人不解的事。但每当我们研究得愈多，发现出愈多的定律，并且对自然界有愈深的了解，就愈明白这是真的。任何定律都免不了这样的毛病。我们的每一条定律都是一种纯粹的数学陈述，用的是相当复杂和深奥的数学。牛顿关于引力定律的陈述，只用到比较简单的数学。而当我们继续前进时，就要用到越来越深奥和越来越困难的数学。这是为什么？我一点也想不出来。我的惟一目的，就是在这里告诉你们这个事实。这一次讲演的要点，就只是强调这一事实：不可能向那些对数学缺乏某种深入理解的人以大家都能够感受到的方式忠实地说明自然定律之美。我很抱歉，但看来只能如此。

你们会说，“好吧，如果没有对定律的解释的话，那么至少要告诉我那条定律是什么吧。为什么不用话语而要用符号来告诉我呢？数学不过是一种语言，而我想要把这种语言转写过来。”事实上只要有耐心，我是做得到的，并且我想我已经在一定程度上做到了。我能够再讲得多一点，更仔细地说明公式的意义，譬如距离是原来的2倍，力就只有原来的四分之一，等等。我可以把所有的符号都转写成言语。换句话说，我能够更迁就那些外行的听众，让他们舒舒服服地坐在那里，指望我为他们说明什么东西。有不少人掌握怎么样对那些外行人使用外行的语言来说明这一类困难和深奥的问题的技巧，从而赢得了好教师或者好作家的美誉。外行的读者就一本一本书地翻阅，希望他能够避开那些复杂的数学，但那些东西总是避不开的，即使是专门讲解科学的最好作品也是如此。那个读者发现，他读到的总是越来越多的混乱，一个接一个的复杂陈述，一件接一件的难懂事物，它们看起来完全没有相互的联系。问题变得模糊不清，而他则希望或许在某一本书里会有某种解释……那本书的作者差不多做到了——也许另一个家伙就要得到成功。

但我不认为那是有可能做得到的，因为数学不仅仅是另一种语言。数学是一种语言加上推理；它就好像是一种语言加上逻辑。数学是一种推理的工具。事实上它是一些人的精心思考和推理的结果的一种庞大集合。通过数学就有可能把一条陈述同另一条陈述联系起来。例如，我可以说引力是指向太阳的。我也可以告诉你，就像我已经做过的那样，行星在运行，那么如果我从太阳到行星画一条线到那个行星，再在隔了某一段确定的时间，例如三个星期之后，行星所扫过的面积将会准确地等于下面三个星期、再下面三个星期的时间里扫过的面积，并且在它环绕太阳运行的每一个位置上都是如此。我可以仔细地说明上面两种陈述，但我不能够说明为什么这两种陈述说的是一回事。自然界表面上看起来的极大复杂性，以及它那每一条已经仔细地向你说明过的有趣的定律和规则，实际上都是十分紧密地交织在一起的。然而，如果你不能够欣赏数学，你就不能够从那些五花八门的事实中看出允许你从一件事实联系到另一件事实的逻辑。

也许你会觉得难以相信，我能够证明，如果力指向太阳的话，行星的矢径就会在相等的时间里扫过相等的面积。因而如果我做得到，我就来做这个证明，向你表明那两件事真的是等价的，使你能够欣赏到比仅仅两条定律的陈述更多的东西。我将要证明那两条定律是有联系的，因而只凭推理就可以把你从一条定律带到另一条，而数学正是一种有组织的推理方法。于是，你就能够欣赏到那些陈述之间的关系之美。下面我来证明受力指向太阳同在相等时间里扫过相等面积这两条陈述之间的关系。

我们从一个太阳和一个行星开始（图9），并且我们设想在某一时刻行星处在位置1上。它是这样运动的，比方说，1秒之后它移动到了位置2。如果太阳没有对行星施加什么力，那么，根据伽利略的惯性原理，它会严格按照一条直线前进。因此，经过同一段时间间隔之后，下一秒它会准确地沿着同一条直线走过同样的距离，到达位置3。首先我们要证明的是，如果没有受力，在相等的时间里行星矢径会扫过相等的面积。我提醒你，三角形的面积等于高乘底的一半。如果那是一个钝角三角形A BC（图10），它的高就是垂直线A D的长度，而底则是BC。现在让我们来比较当太阳没有施加什么力的时候行星矢径所扫过的各块面积（图9）。

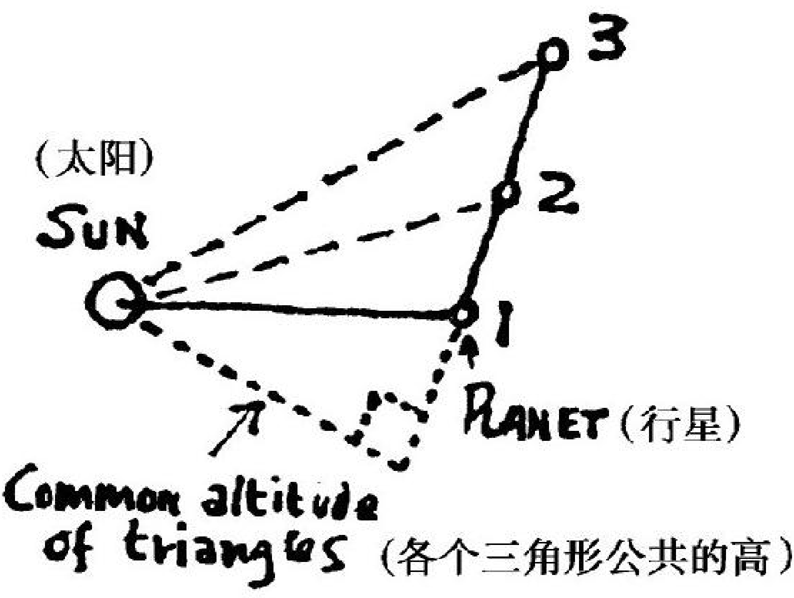


图9

记住，1-2和2-3这两段距离是相等的。问题是，相应的两块面积也是相等的吗？先看由太阳S以及1和2这两点构成的这个三角形。它的面积有多大？这块面积等于它的底1-2的距离，乘以从S到基线的垂直高度的一半。另外那个相应于从2运动到3的三角形呢？它的面积等于底2-3

的距离，乘以到S的垂直高度的一半。这两个三角形有同样的高，并且，我已经说过了，它们有相等的底。一切都很好。假使没有来自太阳的力，在相等的时间内就会扫过相等的面积。但存在着从太阳来的力。在1-2-3这段时间间隔中，太阳拉着行星，并且在朝向自己变化着的方向上改变着行星的运动。为了做一个良好的近似，我们取中间的位置，或者说是平均位置2，然后说在1-2-3这段时间间隔里，行星的运动在2-S上的方向上改变了某一数量（图11）。

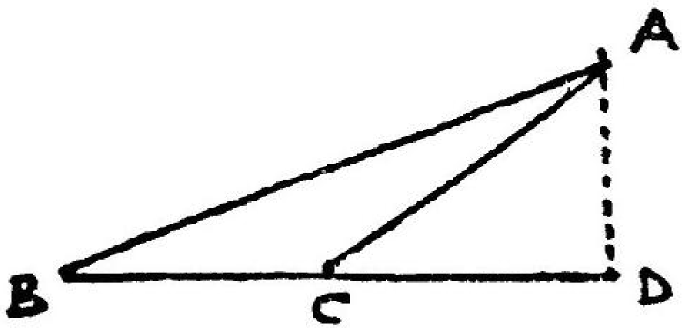


图10

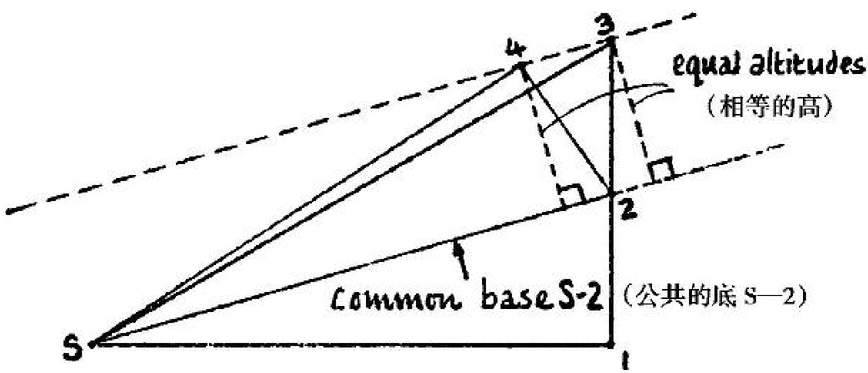


图11

这就意味着，虽然行星是在线段1-2上运动着，并且会在不受力时在下一秒继续沿着同一条直线前进，但由于太阳的影响，使得它的运动改变了一个数量，即在平行于直线2-S的方向上被拨动了。因此，下一步的运动是行星本身想要做的运动，同由于受到太阳的作用而发生的改变相结合。因而行星并没有真的到达位置3，而是落到了位置4。现在我们要比较一下两个三角形S23和S24的面积，我将证明两者是相等的。它们具有相同的底S-2。那么它们有相同的高吗？确实如此，因为它们都落在两条平行线中间。从点4到直线S-2的距离等于从点3到直线S-2（的延长线）的距离。于是，三角形S24的面积就与三角形S23相等。我在前面证

明了两个三角形S12和S23的面积是相等的，所以我们现在知道三角形S12的面积等于三角形S24的面积。那么，在行星的实际轨道运动中，第一秒所扫过的面积是与第二秒相等的。因此，通过上述的推理过程，我们看到了力朝向太阳和扫过的面积相等这两件事实的一种联系。这种论证不是很机灵吗？我这是直接从牛顿那里搬来的。所有这些论证包括插图，正是从他的《自然哲学之数学原理》，即简称为Princip ia的那本书里搬来的。惟一的差别只是在文字上，因为牛顿是用拉丁文写的，而我们这里用的是阿拉伯数字。

牛顿在他的书里是用几何方法来证明的。今天我们不再使用那种推理方法了。那种方法需要巧妙地画出一些正确的三角形，求出各块面积，并且要设计好证明的各个步骤。但在分析方法上已经有了很大的改进，这种方法要更快一些和更加有效。我想在这本书里展示的样子就是，运用更现代的数学记号方法，你什么都不必做，只需要写下一大堆符号，再进行推理和运算就行了。

我们要谈论面积变化得有多快，我们记为áA。当半径扫过空间而使面积变化的时候，这个量就是速度在垂直于半径的方向上的分量乘上半径，它告诉我们面积变化得有多快。因而它就是径向距离的分量乘上速度，即距离的变化率。

$$\dot{A} = \vec{r} \times \dot{\vec{r}}$$

现在的问题是面积的变化率本身是否在变化。这里的原则是说，面积的变化率是不随时间而变的。于是我们对这个量再次微分，意思是运用一点小小的技巧，把一些小圆点加到适当的位置上，如此而已。你需要去学习那些技巧；它不外乎是一系列人们已经发现的对这样的东西非常有用的一套规则。我们写作：

$$\ddot{A} = \dot{\vec{r}} \times \dot{\vec{r}} + \vec{r} \times \ddot{\vec{r}} = \vec{r} \times \vec{F}/m$$

式中第一项说的是取速度在垂直于速度的方向上的分量。它等于零；因为速度当然是同它自己的方向一致的。加速度就是二次微分，用r上面加两点表示，或者说是速度的微分，就等于力除以质量。

因此，这就是说，面积变化率的变化率同力在与半径垂直的方向上的分量成正比。但是，正如牛顿所说的那样，如果力是在半径方向，那么在与半径垂直的方向上就没有力，这就意味着面积的变化率是不改变的。

$$\vec{r} \times \vec{F}/m = 0 \quad \text{or} \quad \ddot{A} = 0$$

（或者）

这仅仅是使用不同的一种记号方法来展示分析的威力。牛顿多少知道怎么样做到这一点，用的是稍微不同的符号；但他为了使当时的人们有可能读懂他的著作，就用几何的形式写下了一切。他发明了微积分，那就是我刚才显示的那种类型的数学。

这是数学同物理学的关系的一个很好的示范。当在物理学的问题上遇到困难的时候，我们常常求助于数学家，他们也许已经研究过这一类东西，并且准备好一条推理的思路让我们利用。也有另外一种情况，那就是在物理学家已经发明了我们自己的推理思路的时候，数学家可能还没有觉悟到，我们就会把它回报给数学家。每一个对于任何事物做了精心推理的人，都是对你所考虑的事情是怎么回事的知识的一项贡献，而如果你把这些知识整理提炼出来并且送到数学系去，他们就会当做数学的一个分支写进书本里去。因而，数学就是从一组陈述推演到另一组陈述的一种方法。数学明显是对物理学有用的，因为我们有这些可以用来谈论事物的不同方式，而数学允许我们推演结果，分析形势，以及以不同的方式修改定律，以便把不同的陈述联系起来。事实上物理学家知道的知识的总量是很少的。他只是要记住一些规则，使他能够从一处到达另一处；而他总是对的，那是因为所有关于在相等的时间里，力沿着半径方向等各种各样的陈述，都是能够通过推理而找到互相之间的联系的。

现在又有了一个有趣的问题。是不是有一个出发点来推出整个理论呢？在大自然里是不是有某种特殊的样式或者秩序，借此我们能够理解某一组陈述更为基本一些，而另一组陈述则更适宜看作是结果呢？有两种看待数学的方式，为了这次讲座的目的，我把它们称为巴比伦传统和

希腊传统。在巴比伦的数学学校里，学生们通过做大量的例题，直到他掌握普遍的规则来学习一些东西。他也会知晓大量关于几何学的知识，关于圆的许多性质，毕达哥拉斯定理，立方体和圆的面积；此外还会在某种程度上学到用来从一件事情到另一件事情的论证方法。他们会运用一些数量的表格去解出复杂的方程。一切都是为了计算出结果。但希腊的欧几里得发现，有一种方法，可以从特别简单的一组公理出发，导出几何学的所有定理。巴比伦数学家的看法，或者我称为巴比伦风格的数学是，你知道了所有不同的数学定理和它们之间的许多联系，但你永远也不会完全认识到，这都是能够从一批公理推出来的。最现代的数学都是集中在一些公理上，以及在关于什么是可接受作为公理的和什么是不可接受作为公理的一个非常确定的约定的框架之内的论证之上。现代几何学采取某些类似于欧几里得几何的公理，经过改进以求完善，然后证明这个理论体系能够得出什么样的推论。例如，不要期望新几何学会让类似于毕达哥拉斯的定理具有公理的地位。（这条定理说的是一个直角三角形的两条直角边上的两个正方形的面积之和，等于斜边上的正方形的面积。）而另一方面，根据笛卡儿关于几何学的另一种观点，毕达哥拉斯定理则是一条公理。

因此，我们要接受的首要事情是，即使在数学里，你也可以从不同的地方出发。如果所有定理都是由推理互相联接在一起的，就没有真正的理由说"这些就是最基本的公理"，因为如果有人告诉你某种别的做法，你也能够进行别种途径的推理。这就正如一座桥梁，它是由非常多的组件构成的，并且它们之间做了许多超出必需数量的联接，那么如果失落了某一些构件，你就能够以另一种方式把它们重新联接起来。今天的数学传统是从选取了一些特殊观念并且把它们约定为公理开始的，然后再从那些公理建立起整个理论结构。我称为巴比伦派数学家的人则会说，"我正好知道这个，并且我正好知道那个，而且我也许知道那个；然后我就从那里做出所有东西来了。到了明天，也许我忘记了这种方法是行得通的了，但我记得另外有种方法是行得通的，于是我把它全部重新构造出来。我永远不十分肯定我应该从哪里开始，又应该在哪里结束。我只是时时刻刻都记得足够多的东西，以便在记忆消退或者其中一些部分失落之时，我每天都能够把那些东西重新拼接到一起。"

总是从一些公理开始的方法，在推导定理方面效率不是很高。要从在几何学里推出什么东西的时候，如果每一次都回到从几条公理出发的方法，那么你的效率不会很高。如果你记住了几何学里的几样东西，你总能够推演前进到别的地方，不过用别的方法效率要高得多。决定了哪一些是最好的公理之后，不一定就找到了在整个领域内进行推理的最佳方法。在物理学里我们需要巴比伦人的方法，而不是欧几里得或者希腊的方法，我下面将会解释这是为什么。

欧几里得方法的问题是，把关于公理的某些东西看成是更有意义或者是更加重要。但是，例如，在引力的情况中我们要问的问题是：说力朝向太阳，或者说在相等时间里扫过相等的面积，哪一个说法更重要、更加基本、或者是一条更好的公理呢？从一种观点看来，关于力的陈述

更好。如果我陈述的是力的性质，我就能够处理由许多粒子组成的系统，其中各个粒子的轨道不再是椭圆了，因为力的陈述告诉了我各个粒子之间是怎样互相拉动的。在这种情况下关于相等面积的定理不再适用。因此我想，应当把力的定理而不是把别的什么当做公理。然而，另一方面，等面积原理也可以推广成适用于由许多粒子组成的系统的另一条定理。这条定理说起来颇为麻烦，而且也不像原先关于等面积的陈述那样漂亮，但它也明显是从原先的定理衍生出来的。取一个由多个质点组成的系统，也许是由看做质点的木星，土星，太阳以及一大堆星星组成的一个体系，它们两两之间都有相互作用，并且离远看投影到一个平面上。（图12）各个质点分别沿着不同的方向运动，我们取任意一点做参考点，然后计算从这一点到每一个质点的半径扫过多大的面积。在这种计算中，加进了质量的因子；如果一个质点的质量是另一个的两倍，扫过的面积就要算两倍。因此我们计算的是质点扫过空间的面积再乘上与其质量成比例的因子，把这些乘积都加在一起，得到的总结果不随时间变化。这个总量叫做角动量，而这一规律叫做角动量守恒定律。守恒的意思正是它不随时间而变。

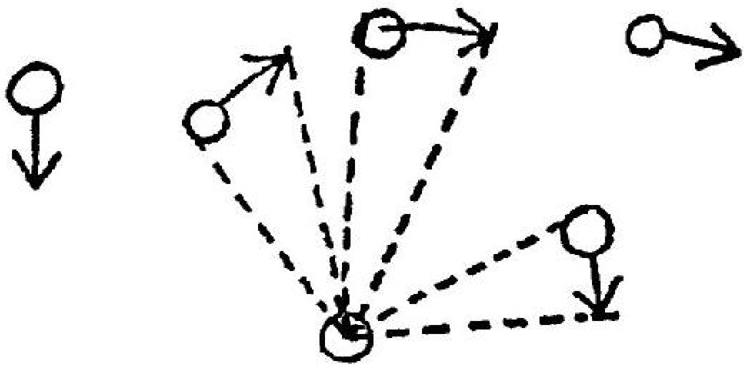


图12

这一定律的一个结果是这样的。设想有一大堆恒星坠落到一起，形成了一个星云或者星系。最初它们距离中心甚远，也即其半径很长，这时它们缓慢地移动，在单位时间内扫过一块小面积。当它们走近时，它们到中心的距离就会缩短，而当它们靠得很近时半径会变得很小；因而，为了在单位时间里扫过同样的面积，它们的运动必定要快得多。那么，你会看到当所有的恒星聚拢来的时候，它们越来越快地边摇晃边打旋，于是我们就能够大致理解螺旋状星云的形状了。我们也能够以同样的方式理解一名溜冰者的自转。他开始的时候把腿伸出去，缓慢地转动，然后他把腿收回，就能够快速地自转了。当腿伸出去时，它贡献了可观的每秒扫过的面积，尔后当他收回他的腿时，他就必须飞快地自转，以产生同样数量的面积。但我不是为溜冰者做这番论证的，溜冰者用的是肌肉的力量，而引力则是一种不同的力。然而这条定律对溜冰者

也是适用的。

现在我们有一个问题，我们能够从物理学的一个部门，例如引力定律，推导出一条原理，而这条原理的有效性又比推导本身要广泛得多。在数学里不会出现这种情况；数学定律不会出现在没有预料到的那些地方。换句话说，假如我们说物理学的公设是引力的等面积定律，于是我们就可以推出角动量守恒，但只是对引力问题有效。然而，我们从实验发现了，角动量守恒是一样意义广泛得多的东西。牛顿有其他一些公设，他可以由此推出更加普遍的角动量守恒定律。但牛顿的那些定律是错的。没有力，它就是一堆废话，质点没有轨道，如此等等。然而，这种类比，关于面积的原理同角动量守恒的精确转换仍然成立。在量子力学的原子运动里它亦成立，并且就我们所知，今天它依然精确地成立。我们有这些意义广泛的原理，从它们可以得出各种不同的定律，如果我们把推导过程看得太重要，并且觉得一条定律能够成立只是因为另一条定律成立，那么我们就难以理解物理学的各个不同分支之间的相互联系。有朝一日物理学完成了，我们掌握了所有的定律，那时候我们也许可能从某些公设开始，无疑有人会想出一种特别的方法，能够从这些公设出发推导出所有的其他东西来。但我们现在还不知道所有的定律，我们能够运用某些定律来猜出一些现在还证明不了的定理。为了理解物理学，人们总是要在逻辑上保持一种灵巧的平衡，并且在他们的脑子里总要记住所有不同的命题以及它们之间的相互关系，因为新的定律往往是在能够从它们推导出来的范围之外。如果所有定律都已知晓，这种做法就不再重要了。

另一件事，一件在数学同物理学的关系方面的有趣而十分奇怪的事，是你能够通过数学论证证明，有可能从许多个看起来不同的出发点开始，推导出同样的一个结果。那是很清楚的。如果你有了一些公理，你也可以从某些定理出发；但物理学的诸定律实际上是这样微妙地构造起来的，使得它们的一些等价的不同陈述，具有性质上不同的特征，这就使得它们变得非常有趣了。为了举例说明，我要以三种不同的方式来陈述引力定律，它们都是精确等价的，但听起来却截然不同。

第一种陈述是，在物体之间有按照我在前面向你们给出过的公式所描写的力：

$$F = G\frac{mm'}{r^2}$$

每一个物体，当它感受到作用于它上面的力时，就会产生加速，或者说以每秒改变一个确定数量的方式改变它的运动。这就是陈述这条我把它叫做牛顿定律的定律的正规方式。定律的这一种陈述说，力依赖于处在远距离之外的什么东西。它具有一种我们称为非定域的性质。作用到一个物体之上的力，取决于处在某种距离之外的另一个物体。

你也许不喜欢超距作用（action at a distance）的观念。这一个物体怎么会知道在一段距离之外发生了什么事呢？因而就有了陈述定律的另一种方式，它是一种十分奇怪的叫做场的方式。它难于说明白，但我想向你们讲讲它像什么的一种粗略的概念。它说的是一种完全不同的东西。在空间中的每一个点都有一个数（我知道它是一个数，而不是一种机制：那是物理学描写的一种麻烦，它必须用数学表达），并且当你从空间中的一处去到另一处时，那些数就会发生改变。如果有一个物体坐落在空间中的一点，它所受的力的方向沿着那个数变化得最剧烈的方向（我会给出它的通用名称——势，力的方向沿着势变化得最剧烈的方向）。此外，力的大小正比于当你在空间中移动的时候势变化得有多快。那是这种陈述的一部分，但还不够，因为我还没有告诉你怎么去确定势在空间中变化的规律。我会告诉你，势与到每一个物体的距离成反比，但那就回到了超距作用的概念了。你能够以另一种方式来陈述这条定律，在这种陈述里你不需要知道在一个小球之外的任何处所发生了什么事。如果你想知道在球体中心的势有多大，你只需要告诉我在球体表面上的势，不管这个球体多么小。你不必去观看外部，你只是告诉我在邻近有什么以及在球体里有多少质量。规则是这样的。球体中心的势等于球体表面上的势的平均值，减去一个我们已经在其他方程里见过的那个常数G除以球体半径（我们称之为a）的2倍，然后再乘上球内的质量，如果球是足够小的话。

Potential at centre = Av. pot. on ball − $\frac{G}{2a}$(mass inside)

中心的势＝球面上的势的平均值－$\frac{G}{2a}$（球内的质量）

你们看，这条定律是别开生面的，因为它讲的是，在一点上发生的情况，是由同它非常接近的区域上的情况决定的。牛顿定律告诉我们的是，一个时刻的情况是由另一时刻的情况决定的。它给出了怎么样从一瞬间求出另一瞬间的方法，但在空间上则是从一个地点跳跃到另一个地点。第二种陈述在时间上和在空间上都是定域的。因为它仅仅取决于近邻的情况。但这两种陈述在数学上是完全等价的。

还有另外一种完全不同的陈述这条定律的方式，不仅在哲学思想上而且在所涉及的定性概念上都是不同的。如果你不喜欢超距作用，我在上面已经证明了，你能够撇开它不用。现在我想要向你们介绍一种在哲学思想上截然相反的陈述。在这种陈述里，完全不必讨论物体是怎么样从一个地点去到另一个地点的；全部内容包含在一个总括性的陈述里，如下所示。当你有一定数目的质点，并且你想要知道其中一个质点怎么样从一个地点移动到另一个地点的话，你想象出一种可能的运动，它是由在一段给定的时间内从一个地点到另一个地点的移动得出来的（图13）。

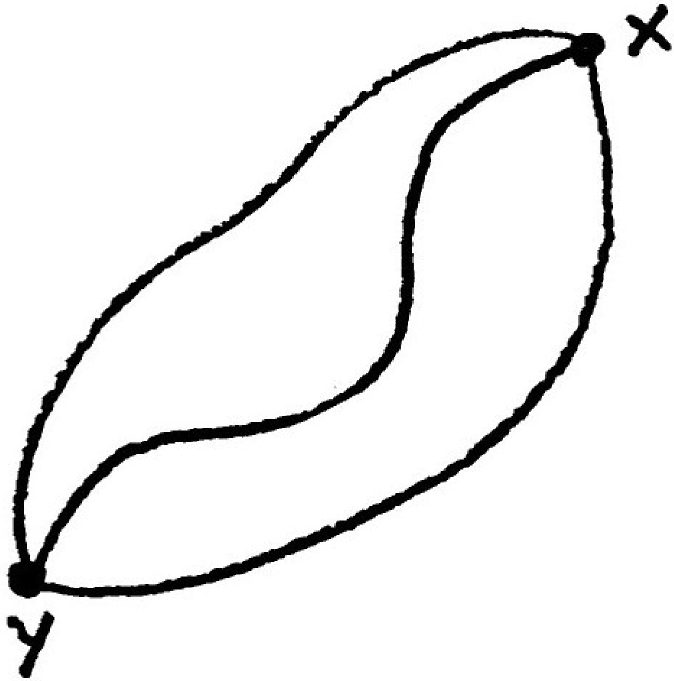


图13

比方说质点要在1小时之内从X到Y，而你想要知道它能够走什么样的路线。那么，你要做的事就是设想一些不同的曲线，然后对每一条曲线计算某一个量。（我不想在这里向你们讲明白这个量是什么，但对那些已经听说过下面这些名词的人，可以说在每一条曲线上的那个量是动能和势能之差的平均值。）如果你对一条路线算出了这个量，然后算另一条，你将会对每一条路线得到一个不同的数。其中有一条路线给出了可能的最小的数，而那就是质点在自然界中实际采取的路线！我们现在通过对全部曲线的一个什么量的计算来描述实际的运动，即椭圆。我们这样做的时候，已经失去了质点感受到拉力并且由于受力而使运动发生变化那样的一种因果性。代替那种因果性的是，质点以某种广博的方式嗅到了所有的曲线，所有的可能性，然后决定采取哪一条（选取我们的量最小那一条）。

这是一个用广泛范围上的各种美丽方式描写自然的例子。当人们说自然界必定有因果性的时候，你就能够使用牛顿定律；或者他们说自然界必须用最小值原理陈述的时候，你就用刚才讲到的那种方式来谈论；或者如果他们坚持说自然界必须有一种定域场——好的，你也能够那样做。问题是：哪一样是正确的呢？如果这些不同的做法在数学上不是精确地等效，如果从某些做法会得出同另一些做法不同的结果，那么我们

需要做的是进行实验，以找出自然界实际上选择的是哪一种做法。人们聚集到一起进行哲学争辩，论证他们喜欢某一种做法胜于另一种；但我们已经从大量经验得知，所有关于自然界是怎样运作的种种哲学直觉都是不成功的。我们要做的只是算出所有的可能性，并且尝试所有的选择。但在现在这一种特殊的情况下，我正在讲的几种理论方法都是精确的等价的。牛顿定律、定域场方法和最小值原理这三种不同的数学程式10，给出的都是精确的相同的结果。那么我们还有什么可做呢？你可以在所有的书籍里读到，在科学上我们不能够决定这一种方法优于另一种方法。那是对的。它们在科学上是等效的。不可能做出一个那样的决定，因为如果得出的结果都是一样的话，就没有实验方法能够把它们分出高下来。但在心理学上会觉得它们在两个方面是十分不同的。第一，你会在哲学上喜欢它们或者不喜欢它们，而只有靠学习才能克服那些弊病。第二，它们在心理学上是不同的，因为当你尝试去猜测新的定律时，它们是完全不等效的。

只要物理学尚未完成，只要我们仍然在尝试了解其他定律，那么那些不同的可能程式就会提供给我们一些关于在别的环境中会发生什么的线索。在那些情况下它们在心理学上不再是等价的了，在我们猜测在一种更广泛的形势下物理定律看起来会是什么样子的时候，它们会发挥不同的作用。举一个例子，爱因斯坦认识到电信号不可能传播得比光速更快。他猜想那是一条普遍的原理。（这就正如你抽象出角动量的概念，并且把它从你已经证明了的一个情况推广到宇宙间其余现象时所做的猜想游戏一样。）他猜想这条原理是普遍适用的，他还猜想对引力也是适用的。如果信号的传播无论如何也不能比光速快，就会弄明白，把力描写成即时起作用的方法是十分不妥的。因而，在爱因斯坦对引力理论的推广中，牛顿那种物理学描述的方法就变得完全过时和太过复杂了。与此同时，场的方法和最小值原理却显得简洁和单纯。我们还没有在这后面两种方法中分出个高下来。

事实上，后来又发现，这两种方法当中，哪一种都不能够以我刚才所陈述的方式被照搬到量子力学里去，但我们弄明白了，一种最小值原理存在的事实，又是在一个微小尺度上粒子遵从量子力学规律的事实的结果。按照我们现今的理解，最好的定律正是这两者的结合，其中我们用到最小值原理加上定域场的定律。现在我们相信物理学的定律需要既有定域的特征，又要有最小值原理，但我们并没有真正弄明白。如果你有一个理论结构，它仅仅是部分正确的，而其中有些东西要失效了，那么如果你写你的理论的时候，写出那些正确的公理，也许只有一条公理是错的而其余仍然可以保留，你就只需要改动那错了的一点东西。但是，如果你使用另外一套公理来写你的理论，就可能会因为它们都依赖于错了的那一点东西，而使它们完全垮台。我们不可能在缺乏直觉的情况下未卜先知，而直觉则是写出理论使得我们能够发现新情况的最佳方式。我们必须在我们的头脑里时时考虑怎么样看一件事物的所有种种不同的方式；因而物理学家们是在做巴比伦式的数学，而不太注意从一些固定的公理出发的精密推理。

自然界的一种惊人特征是可能的解释性方案的多样性。这正是因为那些定律是如此特殊和精巧的缘故。例如，反平方定律是一种允许变成定域描写的定律；如果是反立方定律的话就不可能那样做。在方程的另一头表示的，力同速度的变化率相关这一事实，就是允许以最小值原理的方式写出这些定律的依据。例如，如果力正比于位置而不是速度的变化率的话，你就不可能用那种方式写出定律。如果你对那些定律改动得太多，你就会发现你只能以较少的方式写出它们。我总是发现那样一种奥秘，而我不明白为什么物理学里正确的定律看来总能够以这么多的各种各样的方式来表达的原因。这些定律看来总是能够同时穿过几个入口似的。

我还要说说在数学同物理学的关系方面的几件更普遍一点的事。数学家们仅仅处理推理的结构，并不真正关心他们所谈论的是什么东西。他们甚至不需要知道他们所谈论的是什么东西，或者，像他们自己常说的那样，并不关心他们说的东西是否真正存在。我将要说明这一点。你陈述了一些公理，这样那样的东西是如此如此的，这样那样的东西是如此如此的。然后是什么呢？可以进行逻辑推理而不必知晓这样那样的词语是什么意思。如果关于公理的陈述是精心构成的，而且是足够完整的，做逻辑推理的人在以同一种语言推导新结论的时候，就不必掌握关于那些词语的实际意义的任何知识。如果我在一条公理里使用了三角形这一词语，那么在结论里就会出现一些关于三角形的结论，而在做推理的人也许并不知道三角形是一件什么东西。但是当我读到了他给我的结论，然后回溯说，“你所讲的三角形，那就是一种三条边的什么东西，它是这样那样的”，于是我就知道了他推出来的新事实了。换句话说，如果你有了关于现实世界的一组公理的话，数学家们已经准备好了抽象的推理方法供你使用。但物理学家所说的一切词语都是有意义的。那是一件十分重要的事，许多从数学的道路踏入物理学的人都不懂得这一点的。物理不是数学，数学也不是物理学。两者是相辅相成的。但在物理学里你要理解词语同现实世界的联系。你最终必须把脑子里所想的东西转换为语言文字，转换为同现实世界的联系，以及你正在那里做实验时所用到的黄铜和玻璃等部件的联系。只有通过这种方式你才能发现你的结果是否正确。这是一个单凭数学完全无能为力去解决的问题。

当然，已经发展完善的数学推理方法，对物理学家来说明显是具有巨大的威力和用途的。另一方面，有时候物理学家的推理对数学家也是有用的。

数学家们喜欢把他们的推理做得尽可能的普遍。如果我对他们说，“我想要谈谈普通的三维空间”，他们会说，“如果你有一个n维空间，那么就有这些定理”。“但我只想知道三维的情况”，“好的，把n＝3代入进去！”结果表明，当运用到一种特殊情况时，数学家们的那些复杂定理中，有许多会变得简单得多。物理学家们总是对特殊情况感到兴趣；他对普遍性的东西从来不感兴趣。他正在谈论某些东西；他不是在抽象地谈论任何东西。他想要讨论三维空间里的引力；他从来也不想讨论在n维空间里的任意力。因而需要一定程度上的简化，因为数学家的

这些东西是为在一个广泛范围里的许多问题做准备的。这其实是十分有用的，并且后来总是轮到遇上了困难的物理学家回过头来对数学家说，“对不起，你上次要对我讲关于四维空间的问题……”

当你知道你正在谈论的是什么东西的时候，你用某些符号来代表力，用另一些符号代表质量、惯性，如此等等，那么你就能够运用一大堆普通常识，凭着本能来感受世界了。你已经看到了各种各样的事物，而且你多少知道了那些现象是怎么样发展下去的。但那些乏味的数学家们要把它转换为一些方程，并且由于那些符号对他说来并不意味着任何东西，他除了数学上的精确严格和论证中的小心谨慎之外别无良策。多少懂得了答案是怎样得来的物理学家，就能够挑选某种猜想，并且相当迅速地进行下去。具有高精密度的数学严格性，在物理学里不是十分有用的。但我们不应该为此批评数学家们。不必那样做正是因为，他们必须以那种方式做的一些东西对物理学是有用的。他们是在做他们自己的工作。如果你想要别的什么东西，那你就为你自己把它做出来吧。

下一个问题是，当我们试图猜测一条新定律的时候，我们是否应当运用本能感觉和哲学原理呢？例如：“我不喜欢最小值原理”，或者“我就喜欢最小值原理”；“我不喜欢超距作用”，或者“我就喜欢超距作用”；等等。模型能够在多大程度上有帮助呢？有趣的是，模型确实经常很有帮助，而且大多数物理学教师尝试去讲授怎么样用一些模型去得到事情是怎样做出来的良好物理感觉。但是，结果表明，最伟大的一些发现往往是从某种模型抽象出来的，而那模型本身却一点也不对头。麦克斯韦发现电动力学，起先是在空间中有一大堆空想的齿轮和惰轮的模型上做出来的。但当你抛弃了空间中的所有那些惰轮等东西，电磁理论仍然成立。狄拉克[11]简单地通过猜出方程而发现了相对论性量子力学的正确定律。猜出方程的方法看来是比猜出新定律更加有效的方式。这一事实再次表明了数学是表达自然的一种深刻的方式，而想要把大自然用一些哲学原理来表达，或者用一些本能的机械式感觉来表达的任何尝试，都不是一种有效的方式。

有件事总是使我困惑不已，根据那些我们今天掌握了的定律，对于无论是多么小的空间区域，或者无论是多么小的时间间隔，原则上都可以运用一台计算机进行无限大数目的逻辑运算，从而构想出那里面发生了什么事。在那微小的空间区域里，我们怎么能够知道都发生了些什么呢？为什么应当用无限大数量的逻辑运算去构想出在一块微小的空间/时间区域里所发生的事呢？因而我时常做这样的假设，最终物理学也许不需要一种数学陈述，最后会揭示出那根本的机制，结果得出的定律会是简单的，就像在一张棋盘上看起来很复杂的棋赛，遵从的是简单的规则一样。但这一猜想的性质是和那些说“我就喜欢这样”，“我不喜欢那样”的其他人一样的，而对这些事情做过多的预测是不明智的。

我想引用金斯[12]的一句话来做总结。他说，“伟大的造物主看来是一位数学家”。对那些不懂数学的人说来，的确难于使他们理解对大自然的美、那深层的美的一种真正的感觉。C·P·斯诺[13]谈到有两种文化。我真的

那么想，那两种文化将人们划分为两部分，一部分对数学有足够的理解经验，使得他们能够欣赏大自然之美，而另一部分则因为不懂数学而做不到。

不幸的是这里需要数学，而对某些人说来数学是困难的。有一个流传的故事（我不知道它是否当真），说的是当有一个国王试图向欧几里得学习几何学的时候，他抱怨几何学太困难了。而欧几里得则说，“没有通向几何学的王室道路。”[14]这里也没有王室道路那样的坦途。物理学家不能够把数学转换为另一种语言。如果你想学习自然界的情况，欣赏自然界之美，那就必须懂得她所说的语言。她只以一种形式提供她的信息；我们不会狂妄到要求大自然做出改变来迎合我们的意愿。

你们所能够做出的所有智力上的论证，都不可能讲给聋子的耳朵听，说音乐真的有多么美妙。同样，在世界上所有智力上的论证，也不可能把对世界的理解传达给那些“另一种文化”的人。哲学家们或许会试图通过告诉你们关于自然界有些什么性质而教导你。我则尝试向你们描述自然界。但像哲学家那样是讲不清楚的，因为那是不可能的。或许那是因为他们的见识局限在某些人想象人类是处在宇宙中心那种方式中的缘故吧。

第三章　伟大的守恒定律

在学习物理学诸定律的时候，你会发现有许多复杂的具体定律：引力定律，电磁定律，核作用定律，等等，但在这些具体定律的多样性之上，浮现出一些所有定律看来都要遵从的伟大的普遍原理。这些原理中的一些例子是一些守恒原理，某些对称性质，量子力学原理的一般形式，以及无论你喜欢还是不喜欢，正如我们在上次已经讲过的。所有的这些定律都是数学化的，在这次讲演里我想谈谈守恒原理。

物理学家以一种特定的方式来使用普通的词语。对他来说，守恒定律意味着有一个数，你能够计算出它在一个时刻的值，然后任由自然界进行各种各样的变化，如果你再计算出这个数在一个较晚的时刻的值，它将会与以前相同，这个数没有变化。一个例子是能量的守恒。有一个量你能够依据一定的规则去计算，而不论发生什么情况，总是得到同一个结果。

现在你可以看到，这样一个东西可能是很有用的。倘若我们把物理学，或者进而把大自然类比成是一场巨大的棋赛，棋盘上用到千万只棋子，而我们则试图发现那些棋子走动的规则。进行这场棋赛的伟大的神仙们出手非常快，使得我们跟也跟不上，看也看不清。然而，我们要弄清楚的只是下棋的某些规则，而的确有某些规则是我们不需要盯住每一着棋就能够发现的。例如，假定在棋盘上只有红方的一枚象，那么因为象是按对角线走动的，它就总也不会改变它所坐落的那个方块的颜色[15]，如果在那些神仙下棋的时候我们有一会儿瞄着别处，然后再看回来，我们能够期望看到仍然有一枚红方的象在棋盘上，或许是在一个不同的位置上，但仍然是在同样颜色的方格上。这就是守恒定律的本性。要认识到这一点，我们丝毫也不需要对这种棋赛的什么东西达到深入的了解。

当然，在棋赛里这一特别的定律并不一定是完全有效的。如果我们看着别处很有一段时间，那么可能那枚象被吃掉了，或者有一枚兵走过来靠近一枚后，而那位神仙决定宁可让一枚象而不是一枚后占领那枚兵的位置，它也许就是一个黑色的方格。不幸的是，很可能我们今天看到的有些定律是不完全精确的，而我要告诉你们的是我们现在所看到的样子。

我说过，我们以一种技术性的方式来运用普通的词语，而在这一讲的标题“伟大的守恒定律”里有“伟大”这个词。这不是一个技术性的词：它放在这里仅仅是为了使标题看起来更加醒目，而我也可以只把这一标题叫做“守恒定律”。有几条守恒定律不再普遍成立了；它们只是近似地正确的，但有时候也是有用的，于是我们也许可以把它们称为“渺小”的守恒定律。我在下面会提到一两条那些不再普遍成立的守恒定律，但我

正要讨论的那些主要的守恒定律，依我们今天的认识来说，乃是绝对精确的。

我愿意从一条最容易理解的守恒定律开始，那就是电荷守恒。在世界上有一个数，世界的总电荷，无论发生了什么事，它总是不变化的。如果你在一处地方失去了电荷，你就会在另一处找到它。守恒的是所有电荷的总量。这是由法拉第[16]通过实验发现的。这一实验是在一个大金属球壳里面做的，球壳外面接上一台灵巧的验电器，以便检测球壳上的电荷，因为小量的电荷就能够在验电器上引起明显的反应。在球壳里面，法拉第装上各种各样的古怪的电学设备。他通过用猫的毛皮摩擦玻璃棒而产生电荷，并且他在这个球壳的内部做了一些巨大的静电仪器，使得这个球壳里面就像是那些恐怖电影的工作室似的。但在这些实验期间，在球壳表面上没有检测到电荷；没有产生净电荷。虽然玻璃棒在同猫的毛皮摩擦起电之后会带上正电，同时在毛皮上则带上等量的负电，而总的电量总是为零，因为如果在球壳的内部产生了任何净电荷的话，就会在球壳外部的验电器上看到反应。因而总电荷是守恒的。

这一结果是容易理解的，因为有一个非常简单的模型可以对此做出解释，而完全不必用到什么数学。假定世界仅仅由两种粒子组成，那就是电子和质子（曾经有一段时间，人们把世界就看得这么简单），并且假定电子带着一份负电荷而质子带着一份正电荷，因而我们能够区分这两种粒子。我们能够拿起一块物质，向它上面多加一些电子，或者取走一些电子；再假定电子是永恒不变的，它们绝不会蜕变或者消失——那是一条简单的命题，甚至并非数学化的——那么质子的总数减去电子的总数将不会改变。事实上在这个特定的模型里，质子的总数是不变的，电子的总数也是如此。但现在我们集中注意的是电荷。质子贡献正电荷而电子贡献负电荷，而如果这些粒子永远都不会创生也不会消灭，那么总的电荷就会保持不变。我要在讲演的过程中把讲到的一些守恒量的性质列成表，而我将从电荷开始（图14）。对电荷是否守恒的问题，我在表里写出“是”。

	Charge	Baryon No.	Strangeness	Energy	Angular Momentum
Conserved (locally)	Yes	Yes	Nearly	Yes	Yes
Comes in Units	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Source of a Field	Yes	?	?	Yes	

	电荷	重子数	奇异数	能量	角动量
守恒（定域性）	是	是	几乎是	是	是
以基本单元出现	是	是	是	否	是
一种场的源	是	?	?	是	是

图14

注：这个图表是费曼教授在讲演的过程中不断增添而逐步完成的。

这一理论上的解释十分简单，但后来发现电子和质子并不是永恒不变的；例如，一颗叫做中子的粒子能够蜕变为一颗质子和一颗电子——再加上某种我们下面将会讲到的东西。但中子又是电中性的。因而质子不是永恒不变的，电子也不是永恒不变的，因为它们都可以从一颗中子蜕变而生成，在这个过程中仍然可以计算电荷的得失；在这个过程开始的时候，我们有零电荷，而在过程结束的时候我们有一个正电荷和一个负电荷，把两者加到一起就变成零电荷了。

一个类似事实的例子是除了质子之外，存在着另一种带正电的粒子。它叫做正电子，一颗正电子是一颗电子的某种影像。它在许多方面都正如电子一样，除了它带有正电荷之外；此外，更加重要的是，它被叫做一种反粒子，因为当它遇到一颗电子时，两者会互相湮灭和蜕变，而剩下来的只有光。一颗电子加上一颗正电子正好产生出光。实际上这种光是肉眼看不见的；它是一种伽玛射线；但对物理学家来说是一样的东西，只是波长不同罢了。因而一个粒子同一颗反粒子能够湮灭。光不带电荷，但我们拿掉了一个正电荷和一个负电荷，因而我们没有改变总电荷。电荷守恒的理论因此就变得有点复杂了，但仍然是非数学化的。你简单地把正电子的数目同质子的数目加在一起，再减去电子的数目就行了。但还有别的一些粒子是你需要去计数的，例如带负电的反质子，带正电的π正介子，等等；事实上在自然界中的每一种基本粒子都带有一份电荷（也可以是零电荷）。我们要做的就是把电荷的总数加起来，不论在任何反应中发生了变化，反应之前的电荷总量总是与反应之后的电荷总量相等的。

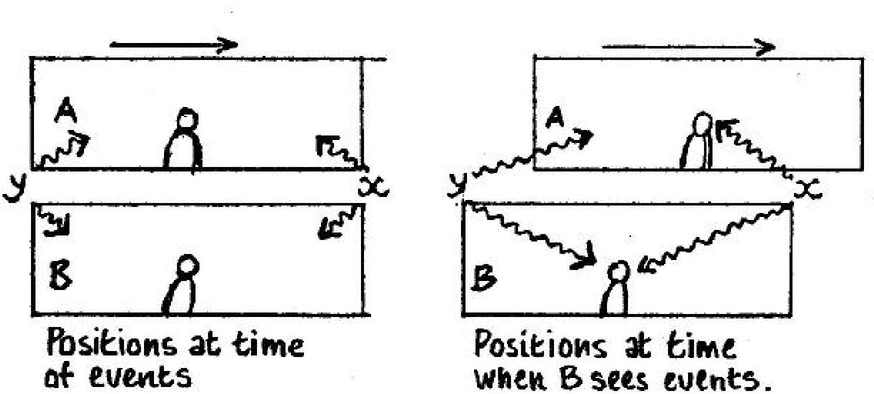
这是电荷守恒的一个方面。现在发生了一个有趣的问题。是不是仅仅说电荷守恒就够了，或者我们还要多说一些？假若电荷守恒是因为它是一些可以到处移动的真实的粒子，那它就会具有一种非常特别的性质。可以用两种方式来保持在一个盒子里的电荷的总量。可以说是电荷从盒子里的一个地方移动到另一个地方。而另有一种可能，就是电荷在某一个地方消失了，同时在另一个地方则出现了电荷，这两件事有即时的关联，这样就使得电荷的总量永远不会改变。守恒的第二种可能性是同第一种不同的，在这种形式里如果一个电荷在一处消失而同时在另一处冒出来，那就要有点什么东西在两个地方之间传送。电荷守恒的第二种形式叫做定域的电荷守恒，它的含义比单单说电荷的总量不变要深刻得多。那么你看到了，我们正在改进我们的定律，而如果它是对的，那

么电荷就是定域守恒的。事实上它是对的。我已经再三再四地试图向你们说明某些推理的可能性，一种观念同另一种观念互相联系的可能性，并且我现在想要对你们描述一种原则上是出自爱因斯坦的论证。这种论证指出，如果有什么东西守恒的话，它必定是定域守恒的。我现在把它应用到的是电荷的情况。这一论证依赖于一件事，如果有两个人，分别乘坐在两艘宇宙飞船里；那么当他们彼此相遇时，哪一个家伙是在运动、哪一个家伙是坐着不动的问题，是不能靠任何实验来判定的。那就叫做相对性原理，说的是匀速直线运动是相对的，我们能够以这一方或者那一方的观点去观察任何现象，而不能够说哪一个静止不动和哪一个是在运动着。

假定我有两艘宇宙飞船，A和B（图15）。我先采取A是在B旁边走过的观点。记住那只是一种看法，你也可以按另一种观点看，最后你也能看到同一种自然现象。现在假定那个静止不动的人想要论证是否在他的飞船一端看到一个电荷消失的同时，在另一端有一个电荷出现，为了确保这种同时性，他不能够坐在飞船的前面，因为由于光的传播需要时间，他就会先看到一个再看到另一个；因而我们假定他非常小心地坐在飞船中间的正中央。在另外一艘飞船上的那另一位也以同样的方式做观察。现在发生了一次闪电，在x点产生了电荷，与此同时在飞船的另一端电荷湮灭了，它消失了。注意，这两件事发生在同一时刻，完全符合于我们关于电荷守恒的观念。如果我们在一处失去了一颗电子，我们就在别处得到另一个，但没有什么东西在这两个地点之间传送。让我们假定电荷消失时发出一次闪光，电荷创生时也发出一次闪光，使得我们能够看得到发生了什么事。静止的B说两件事发生在同一时刻，因为他知道他处在飞船的中央，而光从电荷产生所发出闪电的x处传到他那里的时间，与光从电荷消失所发出闪电的y处传到他那里的时间是相同的。因而B会说，“是的，当一个消失的时候，另一个就创生了。”但我们在另一艘飞船上的朋友看到了什么呢？他说，“不，我的朋友，你错了。我看到x处的闪光比y发生得早。”这是因为他正朝向x运动，因而从x处传来的光所走过的距离，要比从y处传来的光所走过的距离短，这也是因为他正在远离y的缘故。他会说，“不，电荷先在x处创生，然后再在y处消失，因而在x处创生之后到在y处消失之前，在这段短时间内我多得到了一些电荷。电荷并不守恒。那条定律被违反了。”但第一个人说，“是的，但你是在运动。”而第二个人则说，“你怎么知道我在运动？我以为是你在运动哩”，如此等等。如果我们不能够通过任何实验去区分我们是不是在运动时的物理定律有什么不同，那么如果电荷守恒定律不是定域性的，在绝对的意义上，就只有某一类人会看到它是成立的，这指的是静止不动的那个家伙。但是，根据爱因斯坦的相对性原理，这样的一种情况是不可能发生的，因此不可能有非定域的电荷守恒。电荷守恒的定域性同相对论是相容的，而后来明白了，所有的守恒定律都是如此。你可以见识到，如果有什么东西守恒的话，就一定能够运用同样的原理。

关于电荷还有另外一件有趣的事，一件非常奇怪的事，我们今天还没有得到一种真正的解释。这件事与守恒定律完全无关，它是完全独立的另一件事。电荷总是一种基本单元的倍数。当我们有一颗带电粒子，

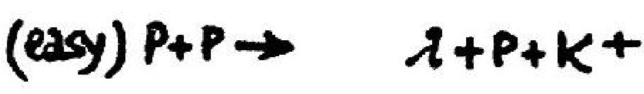
它会有一个电荷或者两个电荷，或者有负一个电荷，负二个电荷。回到我们的表，虽然这张表没有对电荷守恒说些什么，我必须写下守恒的那个东西是以基本单元出现的。它以基本单元出现非常好，因为这就使得电荷守恒的理论很容易理解。它正是我们可以计数的东西，它可以从一个地点到另一个地点。最后在技术上弄明白了，一件东西的总电荷是容易用电学的方法来测定的，因为电荷具有一种非常重要的特征：它是电场和磁场的源。电荷是一个带电物体同电场的相互作用的量度。因而我们应当在表上添加的是：电荷是一种场的源；换句话说，电的性质是同电荷相关的。于是，在这里守恒的那个特殊的量，具有两个同守恒的性质并不直接相关的，但仍然是很有趣的方面。其一是它是以基本单元出现的，其二是它是一种场的源。



（事件发生时 A 和 B 的位置）　（B 看到事件时 A 和 B 的位置）

图15

有许多条守恒定律，我会给出与电荷守恒同一类型的更多一些守恒定律，它们仅仅涉及计数即数出数目。有一条守恒定律叫做重子数守恒。一颗中子可以变成一颗质子。如果我们把每一颗中子和每一颗质子都算做一个叫做重子的单位，那么我们并没有损失重子。中子带有一个单位的重子荷，或者说代表一颗重子，一颗质子也代表一颗重子——我们所做的不过是计数和制造新名词——因而如果我正在讲的，一颗中子衰变到一颗质子、一颗电子和一颗反中微子的反应过程发生了的话，总重子数并没有改变。然而在自然界还有其他一些反应。一颗质子加上一颗质子可以产生为数众多的一些奇异的对象，例如一颗λ，一颗质子和一颗K正介子。λ和K正是这些特别的粒子的名称。



（容易发生）

我们知道，在这个反应中我们放进去了两颗重子，但我们只看到有一颗重子出来，因而有可能或者λ，或者K^+带有一个重子荷。如果我们后来接着研究λ粒子，我们发现它非常缓慢地衰变为一颗质子和一颗π介子，最终那颗π介子又衰变成电子和其他东西。

$$(\text{slow})\ \lambda \rightarrow P + \pi$$

（缓慢发生）

现在我们看到的是，重子重新出现在质子上，因而我们设想λ带重子荷1，而K^+不带重子荷，或者说K^+的重子荷为零。

好了，在我们的关于守恒定律的表（图14）里，我们在有了电荷之后，现在又有了与重子相关的类似情况，得出一条特殊的规则，重子的数目是质子的数目，加上中子的数目，加上λ的数目，减去反质子的数目，减去反中子的数目，如此等等；它只是一道计数式的命题。它是守恒的，它以基本单元出现，每一个人都通过类比设想它是一种场的源，虽然没有人知道是不是这样。我画出这些表的原因是我们正在试图猜出核相互作用的各条定律，而这乃是猜测自然界的快捷方法之一。如果电荷是一种场的源，而重子荷在其他一些方面起着同样的作用，那它也应当是一种场的源。可惜的是，直到现在还看不出这一点，它是有可能的，但尽我们所知尚未能肯定。

还有一两道这样的计数式命题，例如轻子数等，但在观念上是与重子一样的。然而，有一条是稍微有点不同的。在自然界的这些奇怪粒子特征的反应率当中，有一些反应非常快而容易发生，而另外一些反应则非常慢而难于发生。我不是在实际上做实验的技术意义上说快和慢。它指的是当粒子出现时发生反应的概率。对于我在上面提到的两类反应，有一种清楚的区分，例如一对质子的衰变[17]，以及缓慢得多的Λ衰变。结果表明，如果你限于快速而容易发生的反应，就会发现有另一条计数式的守恒律，计算的方法是Λ取负1，K正取正1，而质子取做零。这个数叫做奇异数，或者叫做超子荷，并且它表现得在每一种快速反应中是守恒的，但在缓慢的反应中则不守恒。因而在我们的表（图14）上，我们必须加上一条叫做奇异数守恒或者超子数守恒的守恒定律，它是一条近似成立的定律。这是很特别的；我们由此看到了为什么要把这个量称为奇异数了。在守恒方面它是近似成立的，而在它以基本单元出现的方面则是严格成立的。在尝试了解包括核力在内的强相互作用时，在强相互作用中这个“荷”守恒的事实，使人们提出说它也是与强相互作用相关的一种场的源，不过我们也不知道是否如此。我把这些事情向你们摆出

来，是要向你们表明，怎么样能够用守恒律来猜想新的定律。

历史上曾经一次又一次地提出一些同样具有计数性质的其他守恒定律。例如，化学家们曾经以为，不管发生了什么事，钠原子的数目总是保持不变的。但钠原子不是永恒存在的。原子是有可能发生从一种元素到另一种元素的嬗变的，结果使得原来的那种元素完全消失了。另一条一度被相信是成立的定律，是一个物体的总质量总保持同样的数值。这就视乎你怎么样定义质量以及你怎么样处理质量同能量的关系了。质量守恒定律包含在我下面要讨论的能量守恒定律里。在所有的守恒定律中，能量的处理是最困难和抽象的，但也是最有用的。它比我至今向你们讲过了的那些定律都更困难，因为在电荷以及其他的情况里，其机制是清楚的，或多或少都是某种物体的守恒。这次就绝对不是那种情况了，因为我们从旧的东西得出新的东西的方式是不同的，但它确实只是简单地计数那么一回事。

能量守恒更加困难一点，因为这一次我们有一个不随时间变化的数，但这个数不代表任何特定的东西。我想用一个简朴的类比来对它做一点说明。

我想要你设想一位母亲有一个孩子，这位母亲把孩子单独留在一间房间里，并且给了他28块绝对不可能毁坏的积木。那个孩子成天玩着那些积木，然后当母亲回来的时候，她发现房里确实有28块积木；她就检查出，积木的数目是在所有时间里一直守恒的。这样过了几天，然后有一天，当她回来的时候只有27块积木了。然而，她发现在窗外有一块积木，那是小孩把它扔出去的。那么，你在评价守恒定律是否成立的时候，你必须盯住你要检验的那些东西不会越墙而去。同样的事情也会以其他的方式出现，如果有一个男孩来同这个孩子玩，并且带了一些积木进来的话。当你谈论守恒定律的时候，你显然要考虑到这些事情。假定有一天，母亲回来数积木块的时候，发现只有25块了，但她疑心那个孩子把另外三块积木藏在一个小的玩具盒里面了。于是她说，“我要打开这个盒子。”而他说，“不，你不能打开盒子。”这位非常聪明的母亲会说，“我知道这个盒子空的时候重16盎司（1盎司＝28.35千克，全书同），而每一块积木重3盎司，因而我要做的事是去称量这个盒子。”她把积木块的总数加起来，就会得出公式：

$$\text{No. of blocks seen} + \frac{\text{Weight of box} - 16\text{ oz.}}{3\text{ oz.}}$$

$$\text{看到积木块的数目} + \frac{\text{盒子的重量} - 16\text{ 盎司}}{3\text{ 盎司}}$$

结果重新得到28。这种做法在一段日子里是成功的，然后有一天检查出来的总数又不对头了。然而，她注意到污水槽的水平面升高了。她晓得当水槽里没有积木的时候其水深是6英寸，而在水中有一块积木的时候会升高1/4英寸，于是她在她的公式里再加上一项，现在她有了一道新的公式：

$$\text{看到积木块的数日}+\frac{\text{盒了的重量}-16\text{ 盎司}}{3\text{ 盎司}}+\frac{\text{水面高度}-6\text{ 英寸}}{1/4\text{ 英寸}}$$

并且加起来的结果再次得到28。当那个孩子道高一尺的时候，那位妈妈就魔高一丈，在她的公式里添加更多的一项又一项，其中每一项都代表的是积木块，但从数学的立场看那是一些抽象的运算，因为在后面那些项里并没有出现积木。

$$\text{No. of blocks seen}+\frac{\text{Weight of box}-16\text{oz.}}{3\text{oz.}}+\frac{\text{Ht. of Water}-6\text{in.}}{\frac{1}{4}\text{in.}}$$

现在我做出我的类比，并且告诉你们在这个比喻和能量守恒之间，哪一些是共同的，哪一些是不同的。首先假定在一切的情况下你都没有看见过任何积木块。根本没有“看到积木块的数目”那一项。那么，那位母亲就总是在计算诸如“盒子里的积木”，“水槽里的积木”等许多项。对能量说来有一点差别，就我们所知而言，在能量的情况下根本没有什么一块一块的积木。而且，与积木的情况不同，对能量说来那些数值并不是以整数出现的。我要假定那位可怜的母亲也许会计算出有一项的结果是6（1/8）块积木，算出另一项的结果是7/8块，还有一项是21块，加起来仍然是28。那就是能量的数值看起来的样子。

我们关于能量已经发现了的是，我们有了由一系列规则构成的一个方案。从每一组不同的规则，我们能够为每一不同种类的能量计算出一个数值。当我们把来自所有不同形式的能量的这些数统统加起来，它总是给出同样的总数。但至今我们不知道能量有什么真实的基本单元，不知道有什么作为能量基元的微小滚珠。它是抽象的，纯粹数学化的，有这样的一个数，无论什么时候你计算它，它都是不改变的。我不能够把它解释得比这更明白了。

能量具有各种类型的不同形式，就像上面说的盒子里的积木，水槽里的积木等等一样。有由运动产生的叫做动能的能量，由引力作用产生的能量（它被称为引力势能），热能，电能，光能，在弹簧等物体中的弹性能，化学能，核能等，还有一种一颗粒子仅仅由于其存在就具有的能量，一种直接取决于其质量的能量。这最后一种能量是爱因斯坦的贡

献，你们肯定都已知道。E＝mc2就是我正在谈论的定律的著名方程。

虽然我已经提到了许多形式的能量，我还想要说明一下，我们并不是对能量完全无知，我们确实了解到其中一些能量形式同其他能量形式的关系。例如，我们叫做热能的，在很大的程度上不过是物体内部的各个粒子的动能。弹性能和化学能具有同一来源，它们都来源于原子间的作用力。当那些原子以一种新的方式重新安排它们的状态时，就有一些能量改变了；如果那个量改变了，就意味着某个其他的量亦发生了改变。例如，如果你烧掉什么东西，化学能就改变了，然后你就会发现在你原来不觉得热的地方发热了，因为所有的能量都要加起来保持守恒。弹性能和化学能都是原子之间的相互作用，而我们现在知道这些相互作用是两种东西的结合，其一是电能，而其二又是动能，不过这一回它要采用量子力学的公式了。光能只不过是电磁能的一种形式，因为现在已经把光解释为一种电磁波。核能不能够用其他的能量表示；眼下除了说它是核力的结果之外，我不能够再说什么。我在这里还没有谈到能量的释放。在铀核里有相当数量的能量，当它蜕变的时候那部分能量仍然存在于核变化的产物中，但世界上的总能量是不变的，因此在那种过程中产生了大量的热和其他东西，以保持能量的平衡。

这条守恒定律在许多技术领域里是很有用的。我将给你举一些非常简单的例子，以表明我们掌握了能量守恒定律和计算能量的公式，就能够怎么样理解其他一些定律。换言之，许多其他的定律不是互相独立的，而只是以某种隐蔽的方式去表达能量的守恒。最简单的例子是杠杆定律（图16）。

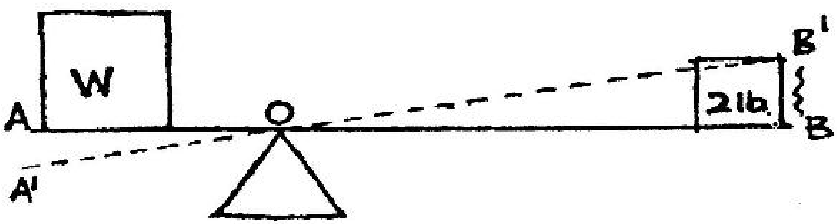


图16

我们有一根架在一个枢轴上的杠杆。它的一臂的长度是1英尺，另一臂长4英尺。首先我们必须给出引力能的定律，在现在的情况下它就是重力势能；如果你有几个重物，你把每一个物体的重量乘以它离地面的高度，然后对所有重物加起来，那就给出了重力势能的总量。假定我在长臂上有一个2磅（1磅＝0.45千克，全书同）的重物，而有一个未知的神秘重物在另一臂上——人们总是用X来代表未知数，因而让我们叫它做W，以显得与众不同！现在的问题是，W必须要有多重才会使得它正好达到平衡，从而了无阻碍地轻轻来回摇摆呢？如果它轻轻地来回摇摆，那就意味着能量同杠杆平衡得平行于地面时，或者倾斜得使那个2磅的重物离地面翘起，比方说1英寸时是一样的。如果能量相同，那它

就随便处在什么位置上也是一样的，并且也不会翻倒。如果2磅的重物向上翘起了1英寸，那么重物W会下坠多少呢？从图中你可以见到（图16）[18]，如果A O长1英尺，OB长4英尺，那么当BB′为1英寸时，A A′将会是1/4英寸。现在运用重力势能的定律。在发生任何事情之前，两边重物的高度都是零，因而总能量是零。为了算出在发生了移动之后的引力势能，我们把2磅的重量乘以1英寸的高度，再把它加上未知的重物W乘以它的高度－1/4英寸。所得的和数必定与先前一样——能量为零。因而有：

$$2-\frac{W}{4}=0, \text{ so } W \text{ must be } 8$$

（因而W必定是8）

这是我们用来理解那条浅显的定律的一种方式，你当然早就知道那条杠杆定律了。但有趣的是，不仅这条定律，而且有成百条其他物理学定律都能够紧密地同能量的各种形式相联系。我向你们讲到这个例子，仅仅是为了显示出能量守恒是多么的有用。

当然，惟一的困难是，因为在杠杆的支点处存在着摩擦，所以这条定律实际上并不真的那么准确。如果我们有某个物体在运动，譬如说有一个球沿着一条恒定高度的路径滚动，那么它就会由于摩擦而停下来。球的动能到哪里去了？答案是球运动的能量转移为地板上和球的表面上的原子来回摇晃所需的能量。我们在一个大尺度上的世界上，看到的好像是一个磨光了的漂亮圆球，但实际上在一个小尺度上看起来，它是十分复杂的；有千千万万个微小的原子，具有各种各样的形状。当足够细致地观察时，它就像一块非常粗糙的卵石，因为它是由这些小球组成的。地板也一样，它是由许多小球组成的一种坑坑洼洼的东西。当你在放大了的地板上滚动这个庞大的卵石时，你能够看到那些微小的原子被不断地推来挤去地摇晃。当那个大家伙滚过去之后，那些留在后面的原子由于受到过推挤而仍然在轻微摆动；因而在地板上遗留着一种摇晃的运动，或者说是热能。初看起来似乎是守恒定律不再成立，但能量有一种躲藏着我们的趋势，使得我们需要温度计和别的仪器来确定它依然在那里。我们发现，不论过程它多么复杂，能量都是守恒的，即使我们还不清楚其中的具体定律。

能量守恒定律的第一次演示，不是由一名物理学家，而是由一名医学家做的。他是用小老鼠做这种演示的。如果你点火把食物烧掉，你能够测定出产生了多少热量。然后如果你把同一数量的食物喂给小鼠吃，食物中的碳就结合空气中的氧变成二氧化碳，同燃烧的过程是一样的。当你测定了这两种情况中的能量产出，你就会发现生物和非生物做的都

是完全一样的事情。能量守恒定律在生命现象同在其他现象里一样是成立的。顺便说说，有趣的是，我们从无生命现象中了解到的每一条定律或者原理，都可以放到伟大的生命现象上去测试，结果证明都是很好成立的。虽然生物比非生物复杂得多，但就我们从非生命界求得的物理学定律而言，还没有什么证据表明其必定不能够用到生物界中去。

在食物中的能量的数量，会告诉你它能产生多少热和机械功等等的数量，它是以卡路里来量度的。当你听到卡路里的时候，并不是说你吃下了叫做卡路里的什么东西，它只是在食物里所含的热能数量的量度。物理学家们有时候觉得高人一头而沾沾自喜，而其他人则总想在某些方面抓住他们的把柄。我会给你们一样东西让他们出丑。他们应当为他们在能量的量度上使用了这么多的不同方式和不同名称而感到十分羞愧。你看有多可笑，能量的单位可以取卡路里，尔格，电子伏特，尺磅，BTU（英国热量单位），马力小时，千瓦小时，等等，它们量度的完全是同一样东西。那就正如我们有美元，英镑等不同的货币一样；但与经济领域不同的是，货币的汇率是可以变化的，而这些呆板的东西之间的比率是有绝对保证的。如果有什么真正相似的话，它就像英国币制里的先令和英镑——总是20先令兑一英镑。但物理学家容许有一种复杂性，不是用像20那样的一个数，而是用像1.6183178……那样的一个无理数，来作为先令对英镑的比率。你也许会设想，至少最现代的高级理论物理学家们该会使用一种公共的单位了吧，但你翻翻文章就可以看到，有用开尔文来量度能量的，还有用兆周以及现在用反费米那样的最新发明[19]的。如果想要得到物理学家也是凡人的证据的话，那么物理学家使用那么多的不同单位来量度能量这种愚蠢的行为，就是一个明证。

在自然界有好些有趣的现象，向我们展示了关于能量的一些稀奇古怪的问题。新近发现了一种叫做类星体的东西，它们离我们非常远，并且以光和无线电波的形式辐射出那么多的能量，我们不禁要问，它从哪里得来这些能量呢？如果能量守恒是对的话，类星体辐射出了如此巨额的能量之后，它的状况必定与辐射之前不同。问题是，那些能量是来自引力能吗——是不是那个东西在一种不同的引力条件之下，发生了引力坍缩？谁也不知道。你也许会提出说，能量守恒定律是不对的。好了，当一样东西像类星体那样还没有被研究透彻（类星体遥远到天文学家不容易观察它们），那么如果这样一个东西似乎同一些基本定律抵触的话，极不可能的是那些基本定律错了，通常正是由于对那些东西的细节还不清楚的缘故。

另一个关于能量守恒定律的应用的有趣例子是一颗中子蜕变为一颗质子，一颗电子和一颗反中微子的反应。起先人们设想的是一颗中子转变为一颗质子加上一颗电子。但衰变前后所有粒子的能量都是可以测量的，而一颗质子和一颗电子的能量加起来达不到中子的能量。存在着两种可能性。可能是能量守恒定律不成立了；事实上玻尔[20]一度提出，或许能量守恒定律只是在统计意义上成立，即只对平均值成立。但后来的结果表明，另一种可能性才是对的，能量收支不平衡是因为有一样别的什么东西跑掉了，那就是我们现在称为一颗反中微子的东西。反中微子

把能量带走了。你会说，反中微子不过是为了保持能量守恒而设想出来的东西。但它还使得其他许多事情正确无误，例如动量守恒定律和其他一些守恒定律，并且新近已经直接证实了，这样的中微子是确实存在的。

这个例子说明了一点。我们怎么样有可能把我们的定律推广到我们尚未清楚明白的领域呢？为什么因为我们在这里检查过能量守恒是对的，我们就总是那么有信心在遇到一种新的现象时能够说要满足能量守恒定律呢？每每你会偶尔在文章里读到，物理学家发现了他们所喜爱的定律之一是错误的。那么把一条定律的正确性推广到你还没有来得及看清楚的领域，是不是犯了错误呢？如果你永远也不说一条定律在你还没有看清楚的领域是对的，那你就不会知道什么新的东西。如果你发现的那些定律仅仅是在你已经完成观察的领域之内，那么你永远也不能做出新的预言。而科学的惟一用处，就是在不断进步的过程中尝试做出新的猜想。因而我们总要去做的事，乃是不顾一切往前进。至于说到能量，最可能的事情就是它在别的地方也是守恒的。

当然这意味着科学不总是确定的；当你对一个你未曾直接体验过的领域提出主张的时候，你必定是不确定的。但是我们总是必须对我们还没有仔细考察过的领域提出设想，不然整个事情就一筹莫展了。例如，一个物体的质量在它运动的时候发生变化，这是因为能量守恒的缘故。由于质量与能量的关系，和运动相联系的那部分能量表现得像一份额外的质量，因而物体在它们运动时就会变重。牛顿相信的不是这种情况，他相信物体的质量是保持恒定不变的。当发现了牛顿的观念错了的时候，每一个人都禁不住说物理学家发现了他们过去错了，这是多么可怕的一件事啊。为什么那些物理学家过去以为他们是对的呢？新发现的修正效应一般是很小的，并且只在你接近光速时才表现出来。如果你转动一只陀螺，它的重量与你没有转动它的时候是一样的，其差别是非常非常小而觉察不到的。那么他们是否应当说，“如果你运动得不那么快，如此等等，那么质量不就没有变化了吗？”那样看来就是如此了。不，因为如果做过了的实验，只限于用木制的，铜制的和钢制的陀螺，那么他们本来应当说的是，“木制的，铜制的和钢制的陀螺，当它们的运动不比什么什么快的时候会怎么样怎么样……”你看，我们不知道在一个实验里我们所需要知道的所有条件，并不知道一个辐射性的陀螺是否具有一种守恒的质量。因而，我们为了发挥科学的一点点用处，就要提出猜想。为了避免简单地描述已经做过的那些实验，我们要在它们观察到的范围之外提出定律。这样做一点也没有错，尽管那样做事实上会使得科学变得不确定。如果你先前想象科学是完全确定的，噢，那只是你那方面的一个失误。

话说回来，在我们关于守恒定律的表中（图14），我们要加上能量。就我们所知，它是绝对守恒的。它不是以基本单元出现的。现在的问题是，它是不是一种场的源？答案是肯定的。爱因斯坦了解到引力是由质量产生的。能量和质量是等效的，因而牛顿关于质量是产生引力的源的解释，已经被修改为能量产生引力这一陈述。

还有其他一些类似于能量守恒的定律，这是在它们都是一些数量的意义上说的。其中之一是动量。如果你取一件物体的所有质量，各自乘以它们的速度，再把这些乘积加在一起，得到的总数就是这些粒子的动量；而动量的总量是守恒的。现在了解到能量和动量关系非常密切，所以我把它们放在我们的表上的同一行里。

守恒量的另一个例子是角动量，我们已经在前面讨论过这个量了。角动量是物体运动时每秒扫过的面积。例如，如果我们有一个运动着的物体，并且我们取不论在什么地点的一个中心，那么将从中心连到物体的一条直线扫过面积（图17）不断增加的速率，乘以物体的质量，再对所有物体加起来就叫做角动量。而这个量是不变化的。

如果你知晓了很多物理学，初看起来你也许会认为角动量是不守恒的。像能量一样，它是以一些不同的形式出现的。虽然大多数人以为它仅仅出现在运动中，但它确实也以其他一些形式出现，我下面来说明这一点。如果你有一根平放着的环形导线，把一条磁铁自下而上地插进去，那么当磁场增加的时候，穿过导线的磁通量随着增加，导线上就会有电流通过——这就是发电机工作的原理。现在设想我们有的不是一条导线而是一个金属圆盘，而金属内部也像导线里面的电子一样有许多电荷（图18）。

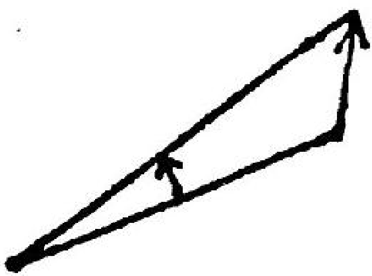


图17

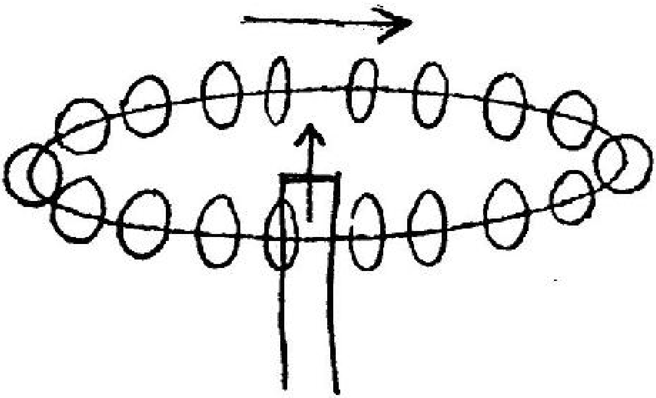


图18

现在我们拿着一条磁铁从远处沿着圆盘的轴线，对准它的中心快速地自下而上地捅过去，因而现在就有磁通量的变化了。那么，像在导线中的情况一样，电荷开始在圆盘里做环状流动，而且如果圆盘是架在一个转轮上的话，在我插进磁铁的时候它就会自转起来。那看起来不像是角动量守恒，因为当磁铁起初离圆盘很远的时候，没有什么东西在转动，而当它们接近到一起的时候圆盘就发生了自转。我们不曾去转动过什么东西，因此这是违反角动量守恒法则的。你会说，“噢，是的，我知道，必定有某种相互作用使磁铁按相反的方向自转。”事实并非如此。磁铁没有受到使它倾向于朝相反方向拧转的电力。这里的解释是，角动量是以两种形式出现的：一种是运动的角动量，另一种是电场和磁场中的角动量。在磁铁周围的磁场中有角动量，虽然它并不表现为运动，它的符号是同圆盘自转的角动量相反的。如果我们显示那相反的情况就更清楚了（图19）。

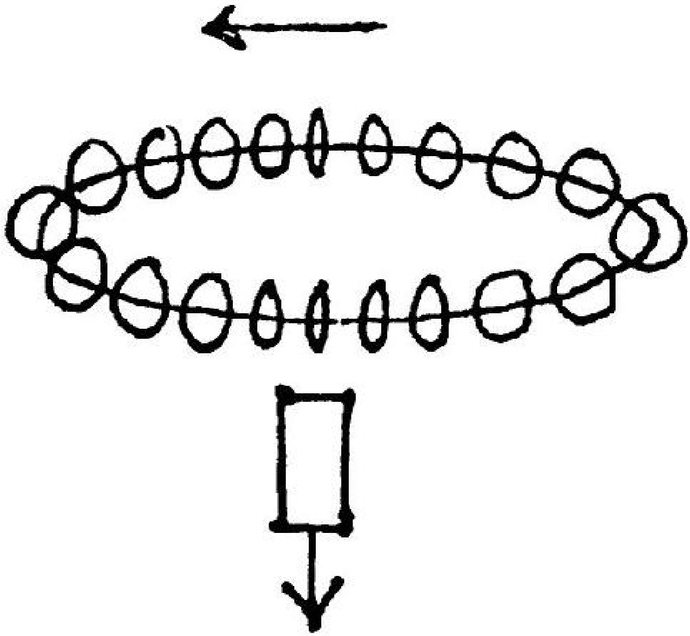


图19

如果我们正好有刚才那些粒子，和那条磁铁靠在一起，而所有东西都静止不动。我说在磁场里面有角动量，那是角动量的一种隐藏形式，并不表现为真实的运动。当你把磁铁往下拉，使它同圆盘分开，那么所有的场都分开了，场里面的角动量就表现出来了，而圆盘就开始自转。使得圆盘自转起来的定律就是电磁感应定律。

角动量是否以基本单元出现的问题，我很难回答。初看起来似乎角动量是绝对不可能以基本单元出现的，因为角动量依赖于你投影图像的那个方向。你注视的是一种面积的变化，它明显依赖于你是正视还是从某种角度斜着来观看，不同的角度会产生不同的结果。如果角动量以基本单元出现，比方说你注视着什么东西，它显示出8个单位，然后如果你从一个稍微不同的角度观看，那单位的数目就会稍微有所不同，也许比8小一点点。而7并不比8小一点点；它比8小可观的一截。因而角动量是不可能以基本单元出现的。然而在量子力学里，这一证明的困难被一种微妙和独特的性质避开了，结果当我们测量对任意轴的角动量时，令人吃惊不已的是它总是一种基本单元的倍数。它不是像电荷那样可以计数的那一类单位。角动量确实在数学意义上是以基本单元出现的，我们在任意测量里得到的数值总是一个确定的整数乘上一个单位。但我们不能够以对电荷的单位适用的同样方式来解释这件事，在这里没有那些我们可以一、二、三……地计数的想象的单位。在角动量的情况，我们不能够想象它们是一些分离的单元，但它总是以一个整数出现……真是非常特别。

还有其他一些守恒定律。它们不像我已经描述过的那些守恒律那么有趣，并且处理的也不完全是数目的守恒。假设我们有某种装置，其中有一些粒子按某种确定的对称式样在运动着，并且假定它们的运动是左右对称的（图20）。那么，依照物理学的定律，无论它们怎样运动和碰撞，你能正确地期望，如果晚些时候你观察那些粒子摆出的花样，它仍然会是左右对称的。因而这里有一种守恒，即对称性质的守恒。这也应当列到图14的表里去，但它不像你测量的一个数，我们将在下一讲更加详细地讨论这个问题。在经典物理学里，对这个问题不是很有兴趣的原因，是由于出现这样漂亮的对称化初始条件的机会实在是太罕见了，因而它就不算做一条非常重要的或者有重大实际意义的守恒定律。但在量子力学里，当我们处理像原子那样非常简单的系统的时候，它们的内部组分常常具有某种像左右对称性之类的对称性，并且那种对称性也会一直保持下去。因此，这是了解量子现象的一条重要定律。

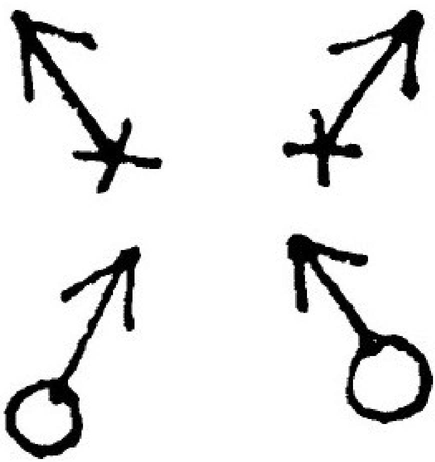


图20

一个有趣的问题是，这些守恒定律是不是建筑在一种更深层次的基础之上，或者我们是不是知道它们看起来是什么样子就够了。我将会在下一讲讨论这个问题，但有一点是我想要在这里提到的。在普及的水平上来讨论这些概念的时候，看来似乎有一大堆互不相关的概念；但对各种原理达到一种透彻的理解，就会看出各个概念之间深刻的相互联系，每一个概念都以某种方式同其他概念相关联。这样的一个例子是相对论同定域守恒的必然性之间的关系。这指的是，如果你不能够说出你运动的速度有多快，就意味着如果有什么东西是守恒的话，它必定不会是从一处跳跃到另一处的。假若我只是叙述了这一种联系而未加证明，那么它就会变得是某种奇迹似的了。

在这里我想要指出的是，角动量守恒，动量守恒，以及几样其他东

西，都是在某种程度上有关联的。角动量守恒是同粒子在运动中扫过的面积相关的。如果你有一大堆粒子（图21），并且把你的参考中心（x）取得很远，那么从中心到每一个粒子的距离都差不了多少。在这种情况下，涉及扫过的面积，或者说涉及角动量守恒的，只有一样东西，那就是动量的一个分量，即在图21中沿垂直方向的那些分量。那么，我们发现的是每个质量乘以其速度的垂直分量再统统加起来的总量必定是一个常数，因为对任何参考点的角动量是一个常数，并且如果所选择的参考点是足够远的话，就只有质量和速度是有意义的。角动量守恒就以这样的方式意味着动量的守恒。这又意味着别的什么东西，它同另外一样东西的守恒是那么密切地联系在一起，使得我以为不必把它放到图14的表上。这是关于重心的一条原理（图22）。



图21

有一块质量关在一个盒子里，它完全不能靠它自己从一个位置消失而跑到另一个位置去。这并不违反质量守恒；你仍然有那块质量，只不过由一个位置运动到另一个位置去了。电荷可以那样，而质量是不可以的。让我们解释为什么。物理学的定律是不会受到运动速度的影响的，因此我们可以假定这个盒子缓慢地向上升起。现在我们对一个不那么远的点x来计算角动量。当盒子向上升时，如果那块质量躺在盒子里的位置1上不动，它就会以一个给定的速率扫过面积。当那块质量已经运动到位置2上，它就会以一个较大的速率扫过面积，因为虽然由于盒子依然在向上升而图上的三角形的高不改变，但从x到那块质量的距离已经增加了。由于角动量守恒，你不能够变动面积变化的速率，因而你就不能够简单地把一块质量从一个位置移动到另一个位置上去，除非你推动别的什么东西以平衡角动量的变化。这就是为什么火箭在虚空中不能够前进……而火箭又确实能够前进的原因。如果你设想有一大堆质量，那么如果你把一块质量推向前进，你必定把别的质量往后推了，使得所有质量向前和向后的总动量等于零。这就是火箭工作的原理。比方说开始的时候它是，在虚空中静止的，然后它向后方喷出一些气体，而火箭就向前进了。这里的要点是，世界上所有东西的质量中心，亦即所有质量的平均位置，仍然保持它先前的所在。对我们有用的那一部分向前进了，而我们不再关心的那一没有用部分则被抛离到后面了。没有一条定理说，世界上对我们所有用的那些东西是守恒的，守恒的只是每一样东西的总量。

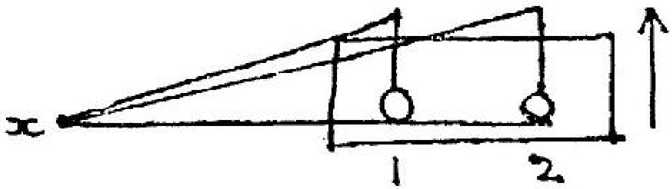


图22

物理学定律的发现，好像要把一些碎块拼接成一幅图画的一场拼图游戏。我们掌握了所有这些不同的碎块，而且今天这些碎块的数目迅速地与日俱增。其中许多碎块到处散落，互相之间衔接不起来。我们怎么知道它们能够拼凑起来呢？我们怎么知道它们真的是一幅尚未完成的图画中的各个碎块呢？我们不能肯定这一点，这个问题诚然困扰着我们，但我们看到了有些碎块的共同特征，从而鼓起了我们的勇气。例如：这些碎块都显现出蓝天白云，都是由某种木质材料做成的。所有不同的物理学定律都遵从着同样的守恒定律。

第四章　物理定律中的对称性

人类的头脑似乎特别着迷于对称性。我们喜欢观赏自然界中的对称花样，例如像太阳和行星那样完全对称的球体，或者像雪花那样的结晶体，或者接近于对称的花朵。然而我要在这里讨论的不是自然界中各种物件的对称性，而是物理学定律本身的对称性。很容易看出一件物体有怎么样的对称性，但一条物理定律怎么能够有一种对称性呢？当然它是不能够的，但物理学家们自己喜欢用一些普通的词语来描述别的什么东西。这一回他们对于物理定律有一种感觉，非常接近于对物体对称性的那种感觉，于是他们就称呼那是物理学定律的对称性。那就是我想要讨论的东西。

什么是对称？如果你看着我，就可以看到我是左右对称的——至少在外表上看来如此。一个花瓶可以有这样或者那样的对称性。你怎样定义它呢？我是左右对称这一事实意味着，如果你把在一边的每一件东西放到另一边去，而那一边的东西则放到这一边来，就是说你只是把左右两边交换，那么我看起来应当是完全一样的。一个正方形有一种特别的对称性，因为如果我把它转过90度，它看起来仍然完全是一样的。数学家外尔教授[21]给出了对称性的一个极好的定义，意思是如果有一件东西，你有可能对它做某种操作，使得你完成了操作之后，它看起来同以前是一样的，那么那件东西就是对称的。这就是我们说物理学定律是对称的意思；我们有可能对物理学定律、或者对物理学定律的表达方式做某种操作，而不引起任何差别，并且定律的任何效果也保持不改变。在这次讲演中我们要谈论的正是物理学定律这一方面的性质。

这一类对称性的最简单例子是一种叫做在空间中迁移的对称性，即空间平移对称性[22]。你将会看到，它不再是你原来对左右对称或者类似的对称性所想象的那个样子。现在的对称性有如下的意义：如果装设了任何一套仪器设备，或者对某种东西做了任何一种实验，然后不是在那里而是在这里装设另一套同样的仪器设备，来对同样的东西做同样的实验，差别仅在于从空间中的一个地方迁移到另一个地方去，那么在搬动了的实验里将会发生在原来的那一实验里本来会发生的同样事情。实际上这样说是不完全对的。如果我真的装设了这样一套仪器设备，然后把它从我现在的位置往左边移动20英尺，那么它就会碰到墙壁，因而产生许多麻烦了。在定义这一观念的时候，必须把会影响到实验状况的每一样东西都考虑在内。那么你在移动一样东西的时候，牵涉到的每一样东西都要跟着迁移。例如，如果设备系统里包括有一具单摆，并且我把这套系统向右移动20 000英里的话，它就不再会完全像原来那样运作了，这是因为单摆的运动牵涉到地球的吸引的缘故。然而，如果我设想把地球连同设备一起迁移，那么实验就会以同样的方式进行了。在这种情况下，问题在于你必须把会产生任何影响的每一件东西都一起搬过去。那听起来有点像废话，因为它听起来似乎你是能够移动一套实验设备的，

并且假若它工作不正常的话，你也能够只归因于你没有把足够多的东西一起搬过去，这样你就立于不败之地了。而关于自然界的一件值得注意的事情，乃是有可能搬动足够多的东西使得实验以同样的方式进行。那是一种正面的陈述。

我想说明这样的一件事是真实的。让我以引力定律作为一个例子，它说的是物体之间的引力与两者之间的距离的平方成反比；并且我提醒你，一个物体对力的响应是在力的方向上随时间而改变它的速度。如果我们有两个物体，譬如一颗行星环绕着太阳运行，而我把这一对物体作为整体移动到别处，那么两者之间的距离当然没有改变，因而力也没有改变。而且，在它们移动了的情况下，它们会以同样的速度运行，并且所有的变化都保持相同的比例，在这两个系统里的每一样东西都以相同的方式进行。定律里面说“两者之间的距离”而不是说与宇宙中心点的某种绝对距离，就意味着定律是可以在空间中迁移的。

好了，那是第一种对称性——空间中的迁移。下一个可以叫做时间上的迁移，但是，我们最好是说时间上的延迟不会造成任何差别。我们让一颗行星在某一个方向上开始环绕着太阳运行；假如我们能够在两小时之后，或者在两年之后在另一个起始点上一切从头再来，而行星和太阳就会以完全一样的方式运行，因为引力定律谈到的也是速度，而绝不是你们假设用来开始测量事物的绝对时间。事实上，在这个特殊的例子里，我们讲得不完全对。当我们讨论引力时，我们谈论过引力随时间变化的可能性。这就会意味着时间上的迁移不是一个有效的主张，因为如果引力常数从十亿年之后开始会变得比现在弱，那么我们那个实验的太阳和地球的系统，在离现在10亿年之后就不会真的如同现在那样运动。就我们今天所知而言（我只能按照我们今天所了解的来讨论那些定律——但愿我能够按照我们明天将会了解的来讨论那些定律！）就我们所知而言，时间上延迟不会导致差别。

我们知道一方面这不是完全对的。它在我们现在称为物理学定律的意义上是对的；但在这个世界上有一件事实是，如果宇宙有一个确定的起始时间的话，那时候一切东西就都会在爆炸中分离开来，这个世界就会大不相同了。你也许会把那叫做一种地理条件，就像当我在空间中迁移的时候我必须把一切东西都随着带走的情况一样。在同样的意义上，你也许会说定律在不同的时间都是相同的，只要我们使每一样别的东西都随着宇宙而膨胀。我们还可以对宇宙在晚些时候启动的另一种情况做出分析；但我们并不能使宇宙启动，我们不能够控制那种情况，并且没有办法在实验上定义有关的概念。因而只要谈到科学，我们就真的没有办法说出什么来。事情的真相是，世界的各样条件看来是随着时间而变化的，各个星系正在互相远离之中，因而在某部科幻小说中，假如你在某一未知的时间醒来，你就可以通过测定星系之间的平均距离来得知你处在什么时间。那意味着如果时间延迟了的话，世界看来会大不相同。

今天我们通常把物理学各定律同世界实际上是怎样开始的陈述分割开来。物理学定律告诉我们的是，如果你在一种给定的条件下启动，那

些东西将会怎么样运动；而我们对世界的起始则所知甚少。一般认为天文学的历史或者宇宙的历史与物理学定律稍有不同。而如果你要考一考我怎么样去定义其间的差别，我就免不了被不停地追问。物理学定律的最佳本性是它的普适性，即普遍适用的特性。如果有任何东西是普适的，那么所有星系的膨胀就是其中之一。因而我没有办法定义那种差别。然而，如果我只局限于我自己而不顾宇宙的起源，仅仅采用那些已知的物理学定律，那么在时间上的延迟不会造成任何差别。

让我们再看看别的一些对称性定律的例子。其中之一是空间中的转动，一种对于固定点的转动。如果我用装设在某个位置的一件仪器来做某些实验，然后再拿另一件完全相同的仪器（可能先要迁移一下，免得挡住了别的东西），但经过转动使它的所有轴线都改变了方向，它也会以同样的方式工作。这一次我们也要把相关的每一件东西都跟着转动。如果那一件东西是一具古老的摆式时钟，并且你把它水平放置，那么钟摆就会只躺在钟盒的壁上不动了。但假如你把地球也转过来（地球在什么时候都是在转动的），摆钟依然会继续运动。

转动的这种可能性的数学描述是相当有趣的，为了描述在一种情况中发生了什么事，我们用一些数来表示一件东西在什么地方。它们称为一个点的坐标，而我有时候用三个数来描写这一点离某一平面有多高，它在前面有多远，或者在后面则以负数表示，以及它在左边有多远。在现在这种情况下我不必顾及上和下，因为讲到转动时我只用到这三个坐标中的两个。让我们称在我前面的距离为x，在我左边的距离为y。那么我就可以通过告诉任何物体在前面有多远和在左边有多远而为它定位。来自纽约市的人都知道，那里的一些街道是按照一种简便的方法，即用数字来命名的——或者说直到他们开始为第六大街改名字之前就是那样做的！关于转动的数学概念是这样的：如果我像我刚才所描述的那样，通过给出一个点的x和y坐标和别的什么东西来给它定位；而面朝不同方向的另一个什么人，也以同一方式，去为同一个点定位，但他计算的是相对于他自己位置的坐标x′和y′，那么他就可以看到，我的x坐标是由另外那个人计算出来的两个坐标的一种混合。两种坐标的变换关系是，x变成x′和y′的混合，而y变成y′和x′的混合。自然界的定律应当是这样写成的，如果你算出了这样的一种坐标混合，再把它重新代入到方程里，那么那些方程将不会改变它们的形式。这就是对称性以数学形式表示的方式。你用某些字母写出方程，然后有一种方法把字母从x和y变换到一个不同的x，即x′，以及一个不同的y，即y′，你得到的方程看起来与原来的用x和y表示的方程是一样的，差别仅在于原来没有撇的坐标都加上了撇。这正意味着另一个人在他的仪器里看到的情况将与我在我自己的仪器里所看到的相同，而他的仪器是已经转过了一个角度的。

我将要给出另一个非常有趣的关于对称性定律的例子。这是以均匀的速度沿着一条直线运动的问题。我们相信沿着一条直线做匀速运动时，物理学定律是不改变的。这叫做相对性原理。如果我们有一艘宇宙飞船，在它里面我们有一台仪器在做着什么事情，而且我们有另一台相同的仪器装设在地面上，如果宇宙飞船以均匀的速度运动，里面有一个

人守候着他的仪器，那么他在仪器里面能够看得到的情况同在地面上静止不动的我在我的仪器上能够看得到的情况没有什么不同。当然，如果他朝外看，或者如果他碰到了飞船的外壁，或者发生了类似的情况，那就是另一回事了；但只要他以均匀的速度沿着直线运动，他所看到的物理学定律同我是一样的。因为事实就是这样的，我不能够说哪一个在运动。

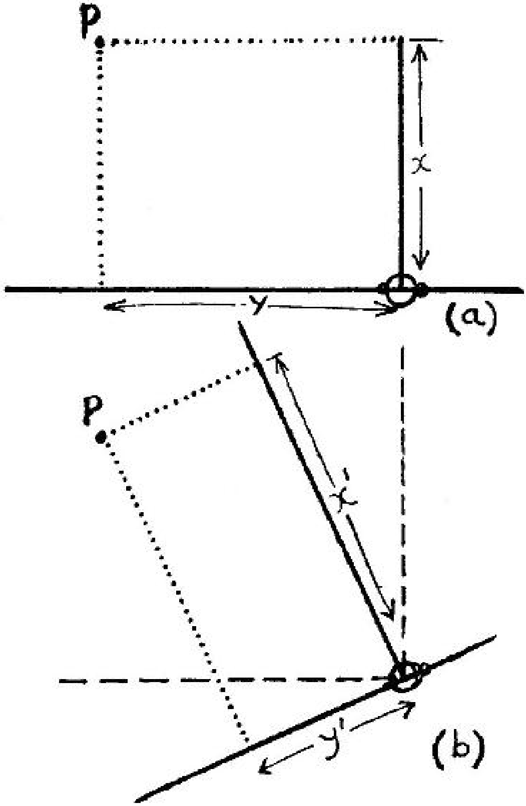


图23

（a）点P相对于我的关系是用两个数x和y来描写的；x表示P在前面离我有多远，y表示在左边离我有多远。

（b）如果我在同一个地点上而只是转过了身，同一个点P是用两个新的数x′和y′来描写的。

在我们做进一步的讨论之前，我必须在这里强调，在所有的这些变换里，以及在所有这些对称性里，我们并不是在谈论搬动整个宇宙。就时间而言，如果我设想我变动了整个宇宙中的时间，那我等于什么也没有说。因而如果我说把整个宇宙的每一样东西在空间中搬动，它会以同样的方式运动的话，这一陈述也是空话。重要的是，如果我把一件仪器搬走，然后我确保满足一系列的条件，以及包括有足够多的仪器，我就能够划出世界的一部分，使它相对于其余所有恒星的质量中心做运动，

这样做仍然不会产生任何差别。在相对论的情况下，它的意思是如果有人相对于星云其余部分的质量中心，以均匀的速度沿着一条直线依靠惯性滑行，他将看不到有什么不同。换句话说，如果不往外看的话，从在一辆车的车厢里做的实验的任何效应，都不可能确定你是否相对于所有恒星在运动着。

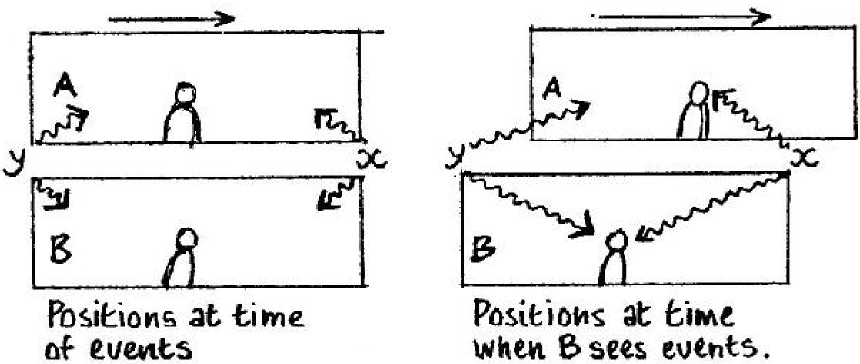
这一命题最早包含在牛顿的陈述里。让我们看看他的引力定律。这条定律说的是，力同距离的平方成反比，并且力的作用产生速度的变化。现在假定我算出了当一颗行星环绕一个固定的太阳运行时会发生什么事，而现在我又想要算出当一颗行星环绕一个移动着的太阳运行时会发生什么事。那么我在第一种情况下的所有速度的值都是与第二种情况不同的；在第二种情况下我要加上一个恒定的速度。但牛顿的定律说的是速度的变化，因此实际上发生的是，固定的太阳对行星施加的力，同移动着的太阳对行星施加的力是一样的，因而两颗行星的速度变化是等同的。因此，当我启动第二颗行星时外加的任何速度只是继续保持下去，而所有的速度变化都是累加在那些速度头上的。数学上的净效果就是，如果你加上了一个恒定的速度，定律将会完全是一样的。因此，我们不能够通过对太阳系以及各个行星环绕太阳运行的方式的研究来计算出太阳本身是不是在空间中漂移。根据牛顿定律，这样一种在空间中的漂移，不会对各个行星环绕太阳的运动产生任何影响；所以牛顿补充说："各个物体在空间中它们自己互相的运动都是一样的，不管空间自身相对于固定的恒星是静止不动，还是以均匀的速度沿着一条直线运动。"

随着时代的进步，在牛顿之后发现了各种新的定律，其中有麦克斯韦[23]的电学定律。电学定律的结果之一是应当有一种波动，电磁波——光就是电磁波的一个例子——它应当以186 000英里每秒的速率行进，正好就是这个数。我说的是186 000英里每秒那么快的速度，会发生什么事呢？那么就容易区分出哪里是静止哪里是运动的了，因为光以186 000英里每秒的速度行进的定律，（初看起来）肯定不是一条允许有人运动得那么快而不产生某种效应的定律。但事实并非如此，很明显，如果你在一艘宇宙飞船里，以100 000英里每秒的速度朝某一方向行进，同时我静止不动，并且我发出一束以186 000英里每秒的速度行进的光，透进你的飞船的一个小孔，由于你的速度是100 000英里每秒而光的速度是186 000英里每秒，那么你所看到的光就只是好像以86 000英里每秒的速度通过一样。但是，如果你做这样的实验，结果表明，你看到的光好像以186 000英里每秒的速度通过，并且我看到的光也好像以186 000英里每秒的速度通过一样！

大自然的有些事实是不容易理解的，上述实验的事实是那么明显地违背常识，以至于有些人依然不相信其结果！但一次又一次的实验指出，不管你运动得多么快，光的速度总是186 000英里每秒。现在的问题是，怎么会这样呢？爱因斯坦认识到，庞加莱[24]也认识到，如果一个人在运动而一个人在静止而两人依然测量到相同的速度，那么惟一可能的方式是他们对时间的感觉和他们对空间的感觉是不相同的，在空间飞船里的时钟的走动速率是与地面上的时钟不同的，如此等等。你会

说，“啊，但如果时钟在走动而我在宇宙飞船里注视着它，那我就看得到它走慢了。”不，你的大脑也走慢了！因而确定了每一件东西都只是在宇宙飞船里面运行，就有可能建立一个系统，在飞船里看来它好像是每飞船秒走186 000飞船英里，与此同时在我看来它好像是每我的秒走186 000我的英里。那是一件要非常机灵精巧才能做到的事，而令人吃惊的是，结果表明，那是有可能做到的。

我已经提到过，这条相对性原理的结果之一是，你不能够说出你沿着一条直线所做的匀速运动有多快；你记得在上一讲里，我们讲到了有两辆车子A和B的情况（图24）。有两桩事件在B车的两端同时发生。有一个人站在车厢B中间，某一瞬间在他的车厢的每一端发生了事件x和y，他宣称两件事件是在同一时间发生的，因为站在车厢中央的他是在同一时刻看到从这两件事件发出的光的。但在车子A上的那个人，他是以恒定的速度相对于B运动的，他同样看到了两件事件，但不是在同一时刻；事实上他先看到事件x，因为他正在向前运动着。你看到了关于以均匀的速度沿着一条直线运动的对称性原理的结果之一是（在这里使用对称性这一名词，指的是你不能够说出谁的观点是对的），当我用“现在”这个词来谈论每一件正在发生着的事，那是毫无意义的。如果你正在以均匀的速度沿着一条直线运动着，那么在你看来是同时发生的事件，并不是在我看来是同时发生的那些事件，即使在我认为是同时的两个事件发生的那一刻我们两人正好相遇。我们不能够对一段距离之外的“现在”的意义达成一致。这意味着，为了保证不可能检测到沿着一条直线的均匀速度这条原理，我们对于空间和时间的观念就要产生一种深刻的转换。实际上只要两个人不在同一地点，而是离得很远，那么在这里发生的事情就是，两件事件从一个人的观点看是同时的，而从另一个人的观点看来则不是在同一时刻发生的。



（事件发生时 A 和 B 的位置）　（B 看到事件时 A 和 B 的位置）

图24

你可以看到，这同空间中的x和y坐标十分相像。如果我站着面对听众，那么我站着的讲台的两面侧墙和我是在同一水平轴线上。它们有同样的x坐标，而y坐标是不同的。但是如果我转过了90°，再看同样的两

面墙，但是从一个不同的观点看了，现在一面墙在我的前头而另一面在我的后头了，它们现在具有不同的坐标x′了。同理，从一个观点看来两件事件是同时（同一个时刻t）发生的，而从另一个观点看来可以是在不同的时间（不同的时刻t′）发生的。因而可以把我讲的这种二维转动推广到空间和时间，把时间加到空间之上以构成一个四维世界。那不仅仅是一种人为的叠加，就像在大多数普及读物里给出的解释那样，“我们把时间加到空间上，因为不能仅仅确定一个位置，你还要说在什么时间。”说得不错，但那并不会构成一种真正的四维空间时间；那只是把两件东西放到一起罢了。在某种意义上，真正空间的特征是它的存在是与特定的地点无关的，从不同的观点去看“前后”坐标，会同“左右”坐标混合。相似地，“过去未来”的时间坐标，也会同某种空间坐标相混合。空间和时间必然是互相联结的；闵可夫斯基发现了这一点之后说，“空间本身和时间本身都将消退为一些阴影，并且只有它们的一种联合会留存下来。”

我把这个特殊的例子讲得这么仔细，因为它是学习物理学定律的对称性的真正开始。正是庞加莱建议做这种分析，看看你能对方程做些什么而方程依旧不变。它是庞加莱注意物理学定律的对称性的态度。空间的迁移，时间的延迟，如此等等，并不是非常深奥的；但以均匀的速度沿着一条直线运动的对称性是十分有趣的，并且它能引出所有类型的结果。而且，这些结果还能够推广到我们还不知道的那些定律。例如，通过猜想在μ介子蜕变过程中这条原理是对的，我们就能够说我们亦不能够运用μ介子来告诉我们在一艘宇宙飞船里飞得有多快；因此我们至少知道了关于μ介子蜕变的一点东西，即使我们并不知道μ介子本来为什么会发生蜕变。

还有许多其他对称性，其中一些属于一类非常不同的类型。我将只提到少数几种。一种对称性是你能够把一个原子替换为另一个同一种的原子，这样做对任何现象都不会引起差别。现在你也许要问“你说同一种是什么意思？”我只能回答说，同一种原子的意思是，当它被换成另一个时，不会引起任何差别。看起来好像物理学家总是在讲废话似的，不是吗？有许多不同种类的原子，如果你把一个原子换成另一个不同种类的原子则会引起差别，但如果你把一个原子换成一个同一种的原子，那就不会引起差别，这看起来好像是一种循环定义。但事情的真正意义是有一些原子是同一种类的；有可能找到一组一组，一类一类的原子，使得你可以在同一种类里将一个原子换成另一个而不引起任何差别。由于在一小块物质里的原子数目约摸是1后面跟着23个零，那么多的原子的一个重要性质是它们都是相同的，或者它们不是完全不同的。我们能够把它们分成有限数目的一两百种不同类型的原子，这真是一件非常有趣的事，因而我们关于能够用另一个同类的原子来替换一个原子的陈述含有丰富的内容。在量子力学里它具有最丰富的内容，但我不可能在这里讲清楚这一点，这部分地，并且仅仅是部分地由于这次讲演的听众在数学上还缺乏训练；但无论如何它都是十分难以捉摸的。在量子力学里，你能够把一个原子换成另一个同一种类的原子这一命题具有一些奇特的结果。它产生了液态氦的特殊现象，液态氦不受任何阻力地流过管道，只

是靠惯性永远流动。事实上存在着同类原子这一事实，是整个元素周期表的来源，也是使得我不会跌落到地板下面的力的来源。我在这里不能够谈到所有这些细节，但我想强调要注意到这些原理的重要性。

讲到这里，你们可能相信所有的物理学定律无论在任何变化下都是不变的，因而我现在要给出几个对称性不成立的例子。第一个是尺度的变动。假使你建造了一台仪器，然后你再建造另一台，它的每一个部件都用同样的材料做成相同的样子，只是尺寸加了倍，如果你认为它仍然会完全按照同样的方式工作，那样想是不对的。你们熟知原子的人都会意识到这一事实，因为如果我做一台仪器，它要小一百亿倍，那么我在这台仪器里也许只有五个原子，而我不能够，比方说只用五个原子来做成一台仪器。显而易见的是，我们在改变尺度上不能走得这么远，但即使在原子图像的完全认识形成之前，人们已经明白这条定律是不对的。你也许在报纸上不时看到，有人用火柴杆做了一座几层楼的教堂模型，每一件东西都比曾经见到过的哥特式教堂更哥特式，而且更精致。为什么我们不去像这样使用巨大的原木建造具有同样的浮华装饰，以及同样程度的繁复雕琢的庞大教堂呢？答案是假如我们确实建造了这样的建筑物，它就会因为太高太重而倒塌。啊！但你忘记了你在比较两件东西的时候，你必须改变系统中的每一样东西。用火柴杆做的小教堂是被地球吸引的，因而做比较的时候，大的教堂就应当被一个更大的地球来吸引。真糟糕。一个较大的地球对它的吸引更强，那些建筑构件肯定很快就破裂了！

物理学定律在尺度的变动下没有不变性的这一事实，最早是由伽利略发现的。在讨论杆件和骨骼的强度时，他论证了，如果你需要为一只较大的动物，比方说一只两倍高，两倍宽和两倍厚的动物配置骨骼时，你将会有八倍的重量，因而你需要能够支持八倍强度的骨骼。但骨骼所能支撑的强度取决于它的横截面，而且如果你做一根两倍大的骨头，它的横截面只大到四倍，只能够支持四倍的重量。在伽利略的著作《关于两门新科学的对话》里，你可以看到他按照实际支持躯体的需要画出的一根想象的巨兽骨头图像，是如何粗壮得不成比例[25]。我设想伽利略自以为发现了自然定律在尺度变动时并不是不变的事实，如同他的运动学定律一样重要，因为这两种定律都收入了他的《两门新科学》里。

另一个不是对称性定律事物的例子是这样一个事实，假如你在一艘宇宙飞船里以均匀的角速率做自转，在这种情况下，说你不能讲出你是否在做转动是不对的。你能。我也许会说，你会感到头晕目眩。这里有两种别的效应；物体由于离心力而被甩向舱壁。（或者不管你喜欢怎么样去描述这种现象——我希望在座的听众中没有大学一年级的物理学教师来纠正我！）有可能通过一具单摆或者一个陀螺仪来说出地球是在转动着，而你可能记得在各个不同的实验室和博物馆里都设有所谓傅科摆[26]的仪器，它证明了地球在转动着，而无须眺望天上的，星星。我们不必朝外看就有可能在地面上证明地球是在以均匀的角速度转动着，因为物理学定律在这种运动中不是不变的。

许多人曾经提出说实际上地球相对于众星系转动着，如果我们也把那些星系转动，就不会产生任何差别。噢，我不知道假如你把整个宇宙转起来会发生些什么事，并且我们现时没有办法晓得这一点。此刻我们也没有任何理论来描写一个星系对我们这里事物的影响，使得从这一理论可以直截了当地而不是靠瞎蒙或者生硬地把转动的惯性，转动的效果，把一只旋转着的桶里的水呈现出凹状的表面等现象，看成是周围的物体施加的力的结果。还不知道到底是不是这样。这应当是被称为马赫原理所说的情况，但那是还没有被证实的情况。更直接的实验问题是，如果我们以相对于星云的均匀速度转动，我们会不会看到任何效应。这个答案是肯定的。如果我们乘坐在一艘宇宙飞船里，相对于星云以均匀的速度沿着直线前进，我们会不会看到任何效应？这个答案是否定的。两件不同的事情。我们不能够说所有运动都是相对的。那不是相对论的意思。相对论说的是，相对于星云沿着直线的均匀速度是检测不到的。

我想要讨论的下一种对称性是一种有趣的对称性，并且有一段有趣的历史。那是空间中的反射问题。我建造了一件仪器，让我们说是一具时钟吧，然后在一段短距离之外我再建造另一具时钟，它是头一具时钟的镜像。这两具时钟就像一双手套的左右手一样，一具时钟的发条朝一个方向拧紧而另一具则朝相反的方向拧紧，如此等等。我上好了两具时钟的发条，把它们放在相应的位置上，然后让它们滴答滴答地走动。问题是，它们会总是保持彼此一样吗？一具时钟的所有机件的运转都同另一个镜像一样吗？我不知道你会怎样猜测这个问题。你可能猜想那是对的；大多数人都那么想。我们当然不是在谈论地理学上的差异。我们能够通过地理环境而分辨出左和右。我们可以说，如果我们站在佛罗里达州而朝纽约州看，那么大西洋就在右手边。那样就分出了左和右，而如果时钟涉及海水它就不能工作，那么因为时钟的走时机械不能够在水里运行，我们就不能够把它摆到海里而是要用别的方式来建造它。在那种情况下，我们本来需要想象地球的地理环境也随着那另一具时钟而转过去；涉及的任何东西都必须一起转过去。我们对历史也不感兴趣。如果你在金工车间捡起一颗螺丝，绝大多数情况下它是一只有右旋螺纹的螺丝；于是你会争辩说，那另一具时钟不会是一样的，这是因为难得找到那些相反螺纹的螺丝的缘故。但那只是我们做了些什么样的事的问题。总而言之，那最先的猜想似乎是没有什么东西造成任何差别。结果表明，引力定律是这样的，如果时钟靠引力工作，那么它不会造成任何差别。电学和磁学的定律是这样的，如果加上了电磁的部件、电流和导线诸如此类的东西，那对应的时钟仍然能够工作。如果时钟涉及通常的核反应来使它运转，它也不会造成任何的差别。但有些东西是会造成差别的，我马上就要谈到它。

你们也许知道，有可能通过让偏振光穿透水溶液来测定溶液里糖的浓度。如果你放好一块偏振片，让光沿着某一轴线穿过偏振片投射到水溶液里去，在观察着光的行进时你会发现，当它穿过越来越深的糖溶液时，你必须把在溶液另一头的另一块偏振片向右转过越来越大的角度才能使光通过。那么，在这里表现出了左和右的分别。我们也可以在时钟里使用糖水和光。假设我们有一玻璃缸水，使一束偏振光穿透它，然后

转动我们的第二块偏振片使得光恰好能通过；然后，假设我们在第二具时钟里做了相应的布置，希望光的偏振方向会朝左转。光不会朝左转；它将仍然朝右转而不能通过。使用了糖水，我们的两具时钟就显出了差别！

这是一件最值得注意的事实，而且它初看起来似乎证明了物理学定律在空间反射下不是不变的。然而我们那一次所用到的糖可能来自甜菜；但糖是一种相当简单的分子，有可能在实验室里，用二氧化碳的水做原料，经过许多步骤把它做出来。如果你试一试人工制造的糖，它在化学上无论哪一方面看来都是一样的，但它不会使光旋转。细菌吃糖；如果你在人工糖的水溶液里放进细菌，结果它们会仅仅吃掉一半的糖，当细菌完工的时候，你把偏振光透射剩下来的糖水，你会发现它向左转。这件事情的解释是这样的。糖其实是一种复杂的分子，它是由一组分子按照一种复杂的排列而构成的。如果你做了完全同样的排列，但把左当做了右，那么这一个糖分子的每一对原子之间的距离同那是一样的，这两个分子的能量是完全一样的，并且对于所有不涉及生命的化学现象都是一样的。但生物会发现其中的差别。细菌只吃其中的一种而不吃另一种。从甜菜提炼出的糖都是同一类的，都是右手性的分子，所以它们都以一个方向使光旋转。细菌只能吃这一类分子。当我们从本身不是非对称的、简单的气态物料制造糖的时候，我们以同等的数量制造出两种分子。然后，如果我们放进细菌，它们将只消灭它们所能吃的那一种而留下了另一种。那就是为什么剩下来的溶液使光朝另一方向旋转的原因。正如巴斯德[27]发现的那样，有可能使用放大镜察看而分拣出两种类型的晶体。我们能够肯定证明这一切都是有意义的，如果我们愿意，我们能够靠我们自己而不必等待细菌来做这种分离工作。但有趣的是细菌能做这件事。这是否意味着生命过程不遵守同样的定律呢？显然不是。看来在生物体内有许多许多复杂的分子，并且这些生物体内的分子都具有一种螺纹的性质。在生物体内最能显示其特征的分子是蛋白质。它们都具有一种开塞钻[28]那样的螺旋走向，就是说是向右旋转的。就我们所知而言，如果我们能够用化学方法制造同样的东西，不过是左旋而不是右旋的，那么那些物质不会有生物学上的功能，因为当它们遇到其他蛋白质时，不能够以同样的方式起作用。左旋螺纹同左旋螺纹相配合，但左旋螺纹同右旋螺纹是无法配合的。细菌在它们体内的化学成分里有右旋螺纹，因而能够区别右旋和左旋的糖。

它们怎么能够做得到呢？物理学和化学只能够制造两种旋向的分子，而不能够区分它们。但生物学能够。容易置信的一种解释是，很久以前当生命过程最早开始的时候，先产生了某种偶然的分子，并且它靠复制自身而繁殖它自己，如此等等，直到许多许多年后，这些形状突兀的一团团生命物质，这里突出一块鼓包，那里伸出一根尖刺，彼此靠近和交流……而我们都不过是这些最早的几个分子的后代，而最早的几个分子采取这种方式而不是别的方式形成，完全是偶然的。必须采取这一种或者那一种方式，或左或右，然后它就复制自己，然后不断繁殖下去。它很像金工车间里的螺丝。你用右手螺纹的螺丝去制造新的右手螺纹的螺丝，如此等等。在生命体内所有分子都具有完全一样的螺纹这一

事实，可能是在完全分子水平的基础上表现出来的生命的始祖的统一性的最深刻的演示。

为了对物理学定律是否对左右都一样这个问题做一个更好的试验，我们可以为我们自己设想如下的问题。假定我们在电话里同一位火星人，或者一位大角星人交谈，而我们想要把地球上的事物描述给他听。首先的问题是，他怎么能懂得我们的话语呢？康奈尔大学的莫里森教授[29]对此有深入的研究，他曾经指出，一种办法是开始的时候说：“滴答，一；滴答，滴答，二；滴答，滴答，滴答，三”；如此等等。那个家伙很快就会懂得这些是数目字。一旦他了解了你的数字系统，你就可以写出一长串的数字来依次代表不同原子的重量或者原子量，然后说“氢，1.008”，接着是氘，氦，如此等等。在他坐下来面对着这些数字的时候，过一会儿他就会发现那些比值与各种元素重量的比例是相同的，因此那些名称就必定是各个元素的名称了。运用这种办法，你会逐步建立一种公共的语言。现在问题来了。假定当你同他混熟了之后，他说，“你这伙计，你真好。我想要知道你们看上去是什么样子。”你先回答说，“我们约摸有六英尺高”，而他说，“六英尺——一英尺有多长？”那还不容易：“六英尺高就是十七亿个氢原子摞起来这么高。”那不是一个笑话——它是向一位没有尺子的什么人描述六英尺有多长的一种可能的办法，假如我们既不能送一个样品给他，双方又不能够看到同样一些物体的话。如果我想要告诉他我们有多高大，我们就可以这样做。由于物理学定律不是在尺子的变动下不变的，因此我们可以运用那一事实去确定尺子的长短。我们可以依法继续描述我们自己——我们有六英尺高，以及我们在外表上如此这般的双侧对称，我们身上还有伸出来的四肢，等等。然后他会说，“真有趣，但你们身体内部看起来像什么样子呢？”于是我就描述体内的心脏等，并且我说，“现在我们的心脏是在左边。”问题是，我们怎么样能够告诉他哪一边是左边呢？你会说，“噢，我们拿些甜菜糖来，把它溶解于水中，然后观察偏振光的旋转……”他的困难只是在于那里没有甜菜。我们也没有办法知道在火星的进化当中发生过什么样的偶然情况，即使在他们那里产生过相应的蛋白质，也可能一开始就是左旋螺纹的。我们没有办法说清楚。经过冥思苦想之后，你明白你做不到这件事，于是你下结论说那是不可能的。

然而，在大约五年前，某些实验产生了各种各样的谜团。我在这里不能够讲述其中的细节，但我们发现我们自己越来越深地陷入困难之中，遇到越来越多的悖谬状况，直到最后李政道和杨振宁[30]提出说，或许左右对称、即自然界对左和右是一样的原理是不对的，这样就有助于解开已经发现的一些奥秘。李政道和杨振宁提出一些更直接的实验来证明这一点，而我下面只讲到在所有做过的实验当中最直接的一个例子。

我们看看一种放射性蜕变过程，例如，在这种过程中发射出一颗电子和一颗中微子；这个例子我们前面已经讲到过了，就是一颗中子蜕变为一颗质子、一颗电子和一颗反中微子的β衰变过程；有许多原子核的这种放射性蜕变过程，其中核的电荷增加一个单位同时放出一颗电子。一件有趣的事情是，如果你测量电子的自旋——电子射出来的时候在自

转着——你会发现它们在向左自转（从它的后面看，就是说，如果它朝南走，其自转方向就与地球相同）。当电子从蜕变过程中射出时总是朝一个方向旋转，按左手螺纹旋转，这一事实具有确定的意义。这就好像是在β衰变过程中射出的电子是由一支来复枪发射出来的一样。有两种方法制造枪膛的来复线；有一个“射出”的方向，而你可以选择子弹在射出时是朝左转还是朝右转。实验证明了发射电子的是一支来复线左旋的来复枪。因此，运用这一事实，我们就能够打电话给我们的火星人说，“听着，取一块放射性物质，一颗中子，然后观察从它们的β衰变过程中射出的电子。如果电子在射出时朝上走，那么从它的后面看，它体内的自转的方向就是朝左边转。那就定义了什么是左。那就是心脏所在的那一边。”因此就有可能从什么是左谈到什么是右，而世界是左右对称的定律就此垮台了。

下面我想要谈的是守恒定律同对称性定律的关系。在上一讲里我们谈到守恒原理，能量，动量，角动量等的守恒。极为有趣的是看来守恒定律同对称性定律之间有着一种深刻的联系。只有在量子力学知识的基础之上，我们才能够对这种联系给出恰当的解释，至少按照我们今天的理解是这样。尽管如此，我还是要向你们讲关于这一点的一种说明。

如果我们假设物理学定律是能够由最小值原理描述的，那么我们就能够证明，如果有一条定律说你能够把所有的仪器都搬到一边，换句话说如果它在空间中是可以迁移的，那么就必定有动量的守恒。这是在守恒定律同对称性定律之间的一种深刻的联系，但那种联系要求采取最小值原理。在第二讲里我们讨论过一种描述物理学定律的方法，即一个粒子在给定的时间范围里尝试不同的路径从一个地点去到另一个地点的方法。存在某一个量叫做作用量，也许这是一个偶然误用的名词。当年按照不同的路径计算作用量时，你会发现这个量实际采取的路径总是比任何其他路径为小。这种描写自然定律的方法是说，对于实际路径来说，用某种公式表达的作用量是所有可能路径当中最小的。说一件东西最小的另一种说法是，如果你起初把路径移动一点点，也不会造成任何差别。假设你正在丘陵地带漫游——是那些平滑的山丘，因为在数学里涉及的东西对应着平滑的东西——你到达一个地点，在那里你是最低的了，然后我说，如果你跨出一小步，你也不会改变你的高度。当你在最低点或者最高点的时候，在第一级近似下，迈出一步不会使你的高度产生任何差别，而你若是在斜坡上，那么你可以迈一步向斜坡下方走去，或者你也可以朝相反的方向迈一步向斜坡上方走去。当你处在最低点，迈出一步不会造成多大差别。这种推理的关键之处，在于假使那样确实造成了差别即升高了的话，那么你朝相反的方向迈一步就会下降了。但是因为这里已经是最低点了，你不能够再下降，因而你的第一级近似是迈一步不会引起任何的差别。因此，我们知道如果把一条实际的路径稍微移动一点点，在第一级近似上不会对作用量引起任何差别。我们画出一条路径，从A到B（图25），现在我要你考虑下面一条可能的其他路径。首先我们从A跳到紧邻的近旁另一点处C，然后我们完全按着相应的路径去到另一点D，它是从点B移动同一数量的结果，当然是这样，因为那是相应的一条路径。现在我们正好发现，自然界的定律是这样的，沿

着路径ACDB的作用量的总量在第一级近似下，是同沿着原先的路径AB一样的——这是当它代表实际的运动路径的时候，从最小值原理得出的结论。我要告诉你一点别的东西。如果当你把每一样东西都迁移过去世界是相同的话，在原来的路径从A到B上的作用量，与从C到D的作用量是相同的，因为这两条路径的差异仅在于你把每一样东西都移过去了。因而，如果空间迁移的对称性原理是对的话，那么从A到B的直接路径上的作用量，是同从C到D的直接路径的作用量一样的。然而，对于真实运动来说，在绕了弯的路径ACDB上的总作用量十分接近于在直接路径AB上的同一作用量，因此真正相同的只是从C到D的那一部分。这条绕了弯的路径上的作用量是三个部分之和——从A到C，从C到D，再加上从D到B的作用量。那么，在减除了相等项之后，你便有可能看到从A到C的贡献加上从D到B的贡献必定等于零。但是在运动中，在这些分段上有一段是沿着一个方向走的，而在另一段上是沿着相反的方向走的。如果我们取从A到C的贡献，想象它是沿着一个方向运动的效应，而从D到B的贡献如同从B到D的贡献但取相反的符号，因为两者的走向是相反的，我们看到有从A到C的一个量是同从B到D的量相配而可以相消的。这是在从B到D的方向上迈一小步对于作用量的效应。那个量，向右迈一小步对于作用量的效应，在开始时（从A到C）是同在末尾时（从B到D）是一样的。因此，有一个量在时间流逝中是不会改变的，只要最小值原理成立，而且空间迁移的对称性原理是对的。不会发生改变的这个量（它代表着朝向一侧走一小步对于作用量的效应）事实上正是我们在上一讲里谈到过的动量。这就证明了对称性定律同守恒定律的关系，只要假定那些定律遵从最小作用量原理。结果表明，它们的确满足最小作用量原理，因为它们是来自量子力学的。那就是为什么我在上面的分析里说对称性定律同守恒定律的关系来自量子力学的缘故。



图25

对时间延迟的相应论证得出能量的守恒。在空间中转动不会引起任何差别的情况，得出角动量守恒。这样我们也能够进行空间的反射而不产生任何变化的效果，而这是在经典物理学的意义上不能够简单地得出来的结果。人们已经将它称为宇称，而他们也有了一条称为宇称守恒的守恒定律，不过那都是一些难以听懂的词语罢了。我要提到宇称守恒，因为你们也许已经在报刊上读到宇称守恒已被证明为不对的了。如果报刊上写出来的是你不能够区别左和右的原理已经被证明为错的，本来就会容易理解得多。

我在谈到对称性的时候，还想要告诉你们的是这里有几个新的问题。例如，每一种粒子都有它的反粒子：一个电子有一个正电子，一个质子有一个反质子。我们能够在原则上制造出所谓反物质，其中每一个

原子都是由相应的反粒子结合在一起组成的。氢原子是一个质子和一个电子；如果我们拿一个带负电的反质子和一个正电子放到一起，它们也会成为一种类似氢原子的东西，一个反氢原子。反氢原子事实上从来不曾做出来过[31]，但已经设想过在原则上它是能够行得通的，并且我们原则上也能够按同样的方式制造出所有种类的反物质。现在我们要问的是，反物质是以同物质一样的方式运作吗，就我们所知确实如此。对称性定律之一是，如果我们用反物质制成了什么东西，那么它的行为方式会同我们用相应的物质制造的东西一样。当然，如果反物质同相应的物质碰到一起，它们就会互相湮灭，并且发出火花。

人们总是相信，物质和反物质具有同样的一些定律。然而，现在我们知道左和右的对称性看来是错的，由此引起了一个重要的问题。如果我们观察中子的蜕变，但是在反物质世界之中——一颗反中子变成一颗反质子加上一颗反电子（亦称为正电子），再加上一颗中微子——问题是，它是否表现出同样方式的行为——这指的是，出射的正电子是否也按左手螺纹旋转呢，抑或它表现出另一种方式的行为呢？直到几个月之前我们还相信它表现出相反方式的行为，即反物质（正电子）是右旋的而物质（电子）是左旋的。在那种情况下，我们真的无法向火星人讲述什么是左和什么是右，因为可能碰巧他是由反物质做成的，当一做他的实验时，他的电子会是正电子，于是它们会以错误的方式自转，并且他会把心脏放到错误的一侧。假定你打电话给火星人，告诉他怎么样去制造出一个人；他造出来了，并且成活了。然后你对他说明我们所有的社会约定。最后，在他告诉了你怎样去建造一艘高效率的宇宙飞船之后，你就乘上它去会见那个火星人，然后你向他走去，再伸出你的右手去同他握手。如果他也伸出他的右手，那就说明一切都没有问题，但是如果他伸出的是左手，当心啊……你们两个就会彼此湮灭！

我很想再同你们多讲几种对称性，但那些对称性都更加复杂而难以说明。还有一些十分有意思的事情，它们就是近似对称性。例如，我们能够区别左和右这一事实，有一个值得注意的地方，就是我们仅仅能够在一种非常微弱的效应，即以β衰变为代表的过程里做到这一点。这意味着自然界有99.99%是不能够区分左与右的，而只有那么一小块区域，一类微小的特征现象是完全不同的，它是绝对不对称的。这是自然界的一个奥秘，还没有谁对此想出一点点线索来。

第五章　过去与未来的区分

每一个人都明白，世界上的各种现象显然都是不可逆转的。我的意思是已经发生了的事情就不会以另一种方式发生。你把一只杯子摔到地上，杯子就打碎了，然后你可以长时间坐在那里，等待那些碎片重新结合起来，并且跳起来回到你的手里。如果你观看海边的波涛卷起浪花，你也可以站在那里等候那些水泡重新聚集到一起，升到海面之上，然后坠落下来离岸而去的伟大时刻——那真是一幅奇妙的美景！

在讲演中演示这样的情景，通常是运用你拍摄了一些现象的电影片段，然后倒过来放映，那么就会赢得满堂的笑声了。听众们之所以发笑，只是因为那是在现实世界里不可能发生的事。但实际上举出那样一些关于过去和未来的明显和深刻的差别，并不是一种那么有力的论证方式；因为即使没有做过实验，我们对于过去和未来的内心体验也是完全不同的。我们能够记得过去，但我们不能够记忆未来。我们对于什么会发生的意识，是与对于什么可能已经发生的意识不相同的。从心理学上看，过去和未来是完全不同的，我们具有记忆和表面上的自由意志，这指的是我们觉得我们能够做些什么去影响未来，但我们当中没有人，或者只有很少人相信我们能够做点什么事情来影响过去。懊悔，遗憾，希望，等等，所有这些词语都明显地把过去和未来完全区分开来。

如果世界是由原子组成的，而且我们也是由原子组成的并且遵从物理学的定律，那么，对于过去和未来的这一显著区别，以及对于所有现象的这种不可逆性的最明显解释，就是某些定律，某些原子的运动定律是单向进行的——即原子的定律是不能够双向进行的。应当在过程中的什么地方存在着某种原理，使得只能够由尤克斯利做成乌克斯利[32]，而绝不能反过来，因而世界就总是从尤克斯利的特征转化为乌克斯利的特征，而这种事物之间相互作用的单向往来，就是使得世界的全部现象看来都朝着一个方向演进的原因。

但我们还没有发现这样的原理。那就是说，在我们迄今已经发现的所有物理学定律里，看来对过去和未来没有任何区别。电影可以正着放也可以反着放，物理学家看到了是不会发笑的。

让我们还是拿引力定律作为我们的标准例子。如果我有一个太阳和一颗行星，而我开始时让行星在离开太阳的某一处沿着某个方向环绕着太阳运行，接着我拍摄了一段电影，然后把这段电影倒过来放，我们会看到些什么呢？行星环绕着太阳运行，当然是沿着相反的方向，仍然维持在一个椭圆轨道上的运动。行星的速率使得其半径在相等的时间里总是扫过相等的面积。事实上它完全按照它所应该做的那样运行。它不能够与其他的运行方式区别开来。因而引力定律属于那种运行方向不会引起差别的定律；如果你把仅仅涉及引力的任意现象拍成电影再倒过来放

映，那么看起来也是完全令人满意的。你还可以按照这种方式做得更加精细。假使在一个更加复杂的系统里的所有粒子的速度突然间倒转了方向，那么事情的进行就会像把原来卷紧了的东西一步一步地解开来一样。如果你有一大堆粒子进行着某种过程，那么当你突然倒转了速度的时候，它们就会倒转过来进行原来的过程。

在这条引力定律里说，速度的改变是力作用的结果。如果我把时间逆转，力并没有改变，因而在相应的距离上的速度没有改变。因此，其后速度的变化次序，完全依照原来的次序反过来进行，于是就容易证明引力定律是可以做时间逆转的。

电磁学定律又怎么样呢？时间可逆转。核相互作用的定律呢？就我们所知而言是时间可逆转的。我们先前有一次谈到过的β衰变呢？也是时间可逆转的吗？在几个月前的实验中遇到的困难，显示出有某种问题，定律中有某种未知的东西，提出了事实上在β衰变里也会是时间不可逆转的，而我们还需要等待更多的实验来弄明白这一点[33]。但至少下面这种说法是对的。在最常见的情况下，可能是时间可逆转也可能是时间不可逆转的β衰变，是一种非常不重要的现象。我对你们讲到的可能性并不依赖于β衰变，虽然它确实依赖于化学作用，依赖于电力，现时看来同核力关系不大，但它也依赖于引力。但我是有偏向的——我在讲话时，发出的声音传到空气之中，而当我张开口的时候它不会倒吸进我的嘴里——这种不可逆性同β衰变挂不上钩。换句话说，我们相信由原子运动产生的、世界上绝大多数日常的现象，是由能够把时间完全逆转的那些定律支配的。因此我们要看深入一些，找出不可逆性的由来。

如果我们仔细地注视我们的行星环绕太阳的运动，我们很快会发现那不是完全对头的。例如，地球绕着它自己的轴的转动是逐渐变慢的。那是由于潮汐的摩擦，并且你会看到摩擦是某种不可逆转的东西。如果我放一块重物在地板上，然后推它，它将会滑动，然后停下来。如果我站在那里等候，它不会突然起动并且加速，然后回到我的手里。因而摩擦效应看来是不可逆转的。但是，正如我们在另一次讲座里讨论过的那样，一种摩擦效应是重物同木地板的相互作用，同其中原子的摇晃相关的一种非常复杂的效应。重物的有规则运动转化为木板中的原子的无规则的晃动。因此我们应当更进一步去观察。

事实上，我们在这里有了表观上的不可逆性的线索了。我要举一个简单的例子。假定我们把掺了墨水的蓝色的水和没有掺墨水的清水放在一个缸里，中间有一块薄隔板，然后我们小心翼翼地把隔板拿走。缸里的水开始的时候是泾渭分明的，一边是蓝色的，另一边是清水。等一会儿。蓝色的水逐渐同清水混合，过了不久，缸里的水变成“浅蓝”色，我指的是一种五十对五十的混合，色素完全均匀地分布开来了。现在如果我们等着并且长时间守候，它不会自行分离。（你能够做某些事情使得蓝色重新分离出来。你可以把水蒸发，再将水蒸气凝结起来放好，并且收集起那些蓝色染料，然后把它溶解到一半的冷凝水里，这样就将事情还原了。但当你这样做你所有的事情的时候，你自己会引起在别处的一

些不可逆的现象。）靠它自己是不会自动还原的。

这给了我们一种提示。让我们注视那些分子。假定我们拍摄了蓝色的水和清水混合的一段电影。如果我们把它倒过来放映，看起来就会是很滑稽的，因为我们开始的时候有混合均匀的水液，然后逐渐分离开来，那确实是非常古怪的。现在我们把图像放大，使得每一位物理学家都可以看到一个一个的原子，以发现到底是什么造成不可逆性——是什么地方过去和未来的平衡被破坏了。好了，你开始了，你注视着画面。你有两种不同的原子（听起来真好笑，但是让我们称呼它们为白原子和蓝原子），它们总是在做摇摆不停的热运动。假使我们在开始的时候，初始的状态应当是绝大多数的一种原子在一边，而另一种的原子则在另一边。然后这些原子，成千上万的原子到处摇晃，并且如果我们开始的时候让所有的一种原子处在一边，另一种原子处在另一边，我们看到在它们不停地无规则运动中，它们将达到混合，而这就是水逐渐从不均匀变成均匀的蓝色的原因。

让我们观察从画面中选取的任意一次原子碰撞，在影片里各个原子沿着某一方向碰到一起又沿另一方向反弹开来。现在把这一段影片倒过来放映，你会发现那对分子沿着另一方向碰到一起又沿某一方向反弹开来。而物理学家以他敏锐的眼光看到了这种过程，并且测量了每一个变量，最后说，“一切正常，那是符合物理学定律的。如果两个分子沿着这一方向来，就会沿着那个方向反弹。”它是可逆的。分子碰撞的定律是可逆的。

因此，如果你过分着重于细节，你就完全不能明白这种现象，因为每一次碰撞都是绝对可逆的，并且虽然整部影片表现出某种不合理的东西，就是说在倒着放映的影片里，各个分子开始的时候是混合在一起的——蓝的，白的，蓝的，白的，蓝的，白的——而当过了一段时间之后，通过所有的那些碰撞，蓝分子同白分子分离开来了。但它们是做不到那个样子的，而生命的偶然出现则应当是蓝分子自行同白分子分离开来，那是一种不自然的过程。而且如果你非常仔细地观察这一段倒着放的影片，那每一次碰撞又都是没有问题的。

好了，你明白了整个事情就是，不可逆性是由生命的一般偶然性引起的。如果你从一堆分开了的东西开始，然后进行一系列不规则的变化，它确实会变得更均匀。但如果你从均匀的东西开始，然后你进行不规则的变化，它不会分开来。它确实是能够分开来的。分子互相碰撞反弹使得它们分离开来，那并不违反物理学定律。那只是没有什么可能罢了。在一百万年里它是不会发生的。那就是答案。事情不可逆的意思只是，它很可能按照一种方向进行，而按另一种方向进行，虽然按照物理学定律是有可能的，但在一百万年里是不会发生的。那就好比如果你坐在那里足够长的时间，希望看到原子的摇晃会把墨水和清水的均匀混合液分离成墨水在一边而清水在另一边那样的荒唐事。

现在在我的实验里放上一个盒子，使得在盒子里每一种分子只有四

个或者五个，过了一段时间它们就会混合起来。但我想你会相信，如果你一直守候着这些分子的永恒的不规则运动，那么在某一段时间之后——不必到一百万年，可能只要一年——你就会看到它们会偶然在一定程度上回到了它们起初的状态，至少是如果我在盒子中间放上一块隔板的话，所有的白分子会在一边，而所有的蓝分子则在另一边。这并不是不可能的。然而，我们所处理的实际对象不是只有四个或者五个蓝分子和白分子。它们具有的分子数目有四到五亿亿亿个那么多[34]，那些分子都要像上面所说的那样分离开来。因而，自然界表面上的不可逆性不必来自基本物理学定律的不可逆性；它来自这样的一种特征，如果你从一个有序的系统开始的话，而自然界具有的不规则性就会通过分子的碰撞反弹使得事情往一个方向演进。

因此下一个问题就是，它们一开始是怎样处在有序状态的呢？也就是说，为什么有可能从有序的状态开始呢？困难在于，我们从一个有序的东西开始，而我们并不以一个有序的东西结束。世界的规则之一是事物总是从一种有序的状况演进到一种无序的状况。顺便说说，有序这个词，像无序一样，是物理学里那些与日常生活里的意思不尽相同的词汇当中的又一个例子。有序不一定是作为人类的你们会感到兴趣的东西，它仅仅指有一种确定的状况，所有的一种东西在一边而所有的另一种东西在另一边，或者这两种东西混合起来了——那就是有序和无序。

那么，问题是事物在开始的时候是怎样成为有序的呢，以及为什么当我们看到任何只是部分有序的普通状况时，我们都能判定它可能是从一种更加有序的状况演进而来的呢？如果我们看着一缸水，其中一边是深蓝色的而另一边是清净的水，并且中间带着浅蓝色，并且我知道那东西已经单独放在那里有二十或者三十分钟了，那么我就会猜到它变成这个样子是因为原先它是分离得更加彻底的。如果我等候得更久一些，那么蓝色的水和清水将会进一步互相混合，如果我知道这个东西已经单独放置足够长的时间的话，我就能判定过去的某种状况。事实上它的两边显得“平滑”过渡，只能是由于它在过去分离得更加鲜明的缘故，假使它过去不是分离得更加鲜明，那么从那时以后，它将会变得比它现在混合得更加均匀。因而我们就有可能从现在推知过去的某种情况。

事实上，物理学家们通常并不沿这一方向做得很多。物理学家们喜欢想，你们要做的只是说，“现在有这些条件，那么下面会发生些什么呢？”但所有我们的兄弟科学都有一个完全不同的问题：事实上在历史学，地理学，天文学史等所有研究其他东西的学科，都有一个这样另一类的问题。我发现他们有能力做出与物理学家完全不同类型的预言。一名物理学家说，“这种条件下，我会告诉你下面会发生什么。”但一名地理学家则会说这一类的话，“我掘开地下，然后我发现了某种骨头。我预言如果你掘下去的话，你就会发现一种类似的骨头。”历史学家，虽然他谈论的是过去，但也能通过谈论未来来做这件事。当他说法国大革命于1789年发生，他的意思是如果你读到另一本有关法国大革命的书，那么你将会看到同一个年份。他所做的是做出某种他以前从来不曾见到过的东西，以及某些尚待发现的文件的预言。他预言在写着某些有关拿破仑

事情的文件里的内容将会与在其他的文件里写的内容相符合。问题是怎么样能够如此呢——而使得那样成为可能的惟一途径，看来是世界的过去在这种意义上要比现在更加有组织得多。

某些人曾经提出，世界是通过这样的途径变得有序的。一开始的时候整个世界只有不规则的运动，就像混合的水液一样。我们看到过，如果你等候的时间足够长，在只有几个原子的情况下，水会偶然地变得分离开来。某些物理学家（一个世纪之前）提出说，发生这样的情况，全是由于世界这个不停运行的系统发生着涨落的缘故。（那是用来描写稍微偏离通常的均匀状况的一个术语。）它在涨落，而现在我们正守候着它通过涨落重新恢复自己。你会说，“但你要等候多久方才看得到这样的涨落呢？”我知道，但如果没有发生过那么凑巧的涨落，使进化得以进行，使一名有智慧的人得以诞生，我们本来也不会注意到这件事。因而我们就是要一直守候住，直到我们能够活着见得到那样的涨落——我们至少要有那么大的一种涨落。但我相信这种理论是不正确的。我想，由于以下的原因，它是一种荒谬的理论。假使世界更大一些，并且各个原子充满着每一处地方，从一种均匀混合的原始状态开始，那么假设我碰巧只能够看到在一个地方的原子，并且发现那里的原子都分离开来了，我还是没有办法判定在任何别的地方的原子也都分离开来了。事实上，假使事情确是一种涨落，并且我注意到有一处地方出现某些奇怪的东西，那么最可能的情况是在别的任何地方都没有奇怪的事情发生。那就是说，我需要找到一些偏差，使得情况失去平衡，但你是找不到那么多的偏差的。在蓝色的水和清水的实验里，当最终盒子里的几个分子都分离开来的时候，最可能的情况是水的其余部分仍然是混合起来的。因此，虽然当我们注视天上的群星和我们注视这个世界的时候，我们看到的是每一样东西都是有序的，假使真有一种涨落，就会预言说如果我们注视一处以前从来没有视察过的地方，就会看到它是无序而杂乱的。虽然我们所看到过的物质分离成炽热的群星和寒冷的空间，假使这种状况确是一种涨落的话，那么我们就会期望在我们没有看到过的地方发现群星与空间并没有分离开来。并且由于我们总是预言说在我们没有看到过的地方将会看到处在相似条件下的群星，或者发现关于拿破仑的同样陈述，或者将会看到与我们以前看到过的骨头相像的一些骨头，所有那些学科里预言的成功都指示着世界并不是来自涨落，而是来自一种过去比现在更加分离，更加有组织的状况。因此我觉得有必要在物理学定律之外加上一条假设，在技术性意义上，宇宙的过去比今天更加有序——我想这是令不可逆性有意义，并且使它得到理解所必需的一条额外的陈述。

这样一条陈述本身当然在时间上是有偏向的；它说过去的某些东西是与将来不同的。但它来自我们通常称为物理学定律的范围之外，因为我们今天试图区别支配着宇宙发展的规则的那些物理学定律的陈述与描述世界过去状况的定律。后者被认为是属于天文学的历史——也许有朝一日它也会成为物理学定律的一部分。

现在我想要讲述不可逆性的几种有趣的性质。其中之一是认真地看

看，一种不可逆的机械到底是怎样运作的。

假定我们建造了某种东西，我们知道它应当是只能够单向运作的。实际上我们要建造的是一个带有棘齿的轮子——轮子周边满是锯齿，锯齿的一边呈尖锐的角度，而另一边则相对平缓。这个叫做棘轮的轮子安装在一根转轴上，它同一只小棘爪配合，棘爪安装在一根枢轴上，并有一根弹簧向下拉住它（图26）。

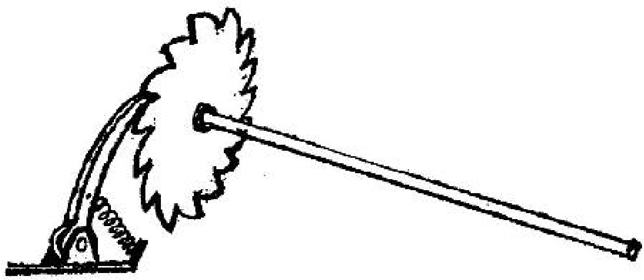


图26

现在轮子只能够单方向转动了。如果你试图反过来转它，那些棘齿的尖角部分卡住棘爪，棘轮就动不了；而如果你按另一方向转动棘轮，那么棘爪正好滴答滴答地跳过一个又一个的锯齿。（你晓得这一类的东西：在时钟里运用着棘轮机构，并且在手表内部也有这一类的东西，使你在上发条的时候只能单方向拧转。）在只能够单方向转动的意义上，棘轮是完全不可逆的。

现在，已经有人想出来，这种不可逆的机械，这种只能够单方向转动的轮子，可以用来做一件非常有用和有趣的事情。[35]正如你所知道的那样，分子有一种永恒的不规则运动，并且如果你利用这一性质建造了一种非常精巧的器械，它就会由于它所受到的附近空气分子的不规则撞击而总是在摇晃着。好了，那是一种非常聪明的想法，在一套棘轮机构的转轴上装上四块叶片，就像这样（图27）。这些叶片装在一个充有空气的盒子里面，它们就总是受到空气分子不规则的撞击，使得叶片时而被推向一边，时而被推向另一边。但当叶片被推向一边时，这件东西被棘爪卡住了，而当叶片被推向另一边时，它就会转起来，因而我们发现轮子会永恒地转动下去，于是我们就得到了一种永恒运动的机械。那是因为棘轮机构是不可逆的缘故。

但是，事实上我们必须更加仔细地考察这些东西。这一套装置工作的方式是那样的，当轮子向一个方向转动的时候它先把棘爪顶起来，然后棘爪跳落下去抵住棘齿的底部。然后它会再反弹起来，并且如果它具有理想的弹性，它就会一直反弹，反弹，反弹，而仅当棘爪偶尔跳得太高时轮子才会朝另一方向转动。因而这样就不灵了，除非当棘爪落下来

时它被挡住了，或者停住了，或者反弹再切入。如果它反弹再切入，就必定有我们称之为阻尼或者摩擦的效应，并且在落下再反弹再停住这种惟一使得它能够单方向转动的过程中，由于摩擦会产生热量，因而轮子就会变得越来越热。然而，当轮子变得很热时就会发生别的事情。那正是布朗运动，即由于围绕着叶片的空气分子的不规则运动所产生的效应，因此，不管棘轮和棘爪是由什么材料做成的，也不管它们是由什么部件组成的，都要变得更热，并且开始以一种更加不规则的方式来运动。当棘轮变得那么热的时候，棘爪就会由于它内部的分子运动而只是简单地上下晃动，并且它由于分子运动而在轮子上跳上跳下，这就好像使得叶片转动起来所受到的撞击一样。棘爪在棘轮上跳上跳下，往上跳和往下跳的次数一样多，那么那些棘齿就可以随便朝哪一个方向转动了。我们不再拥有一台单向运动的装置了。事实上，事情还可以反过来驱动！如果轮子是热的而叶片部分是冷的话，你认为应当只能单向转动的轮子也会朝另一方向转动，因为每一次棘爪落下时，它是落在棘轮的一个齿的倾斜面上，这样就会推动轮子“反向”转动。然后它会再跳起来，落到另一个倾斜面上，重复着以上的过程。因此，如果轮子比叶片热的话，它就会朝错误的方向转动。

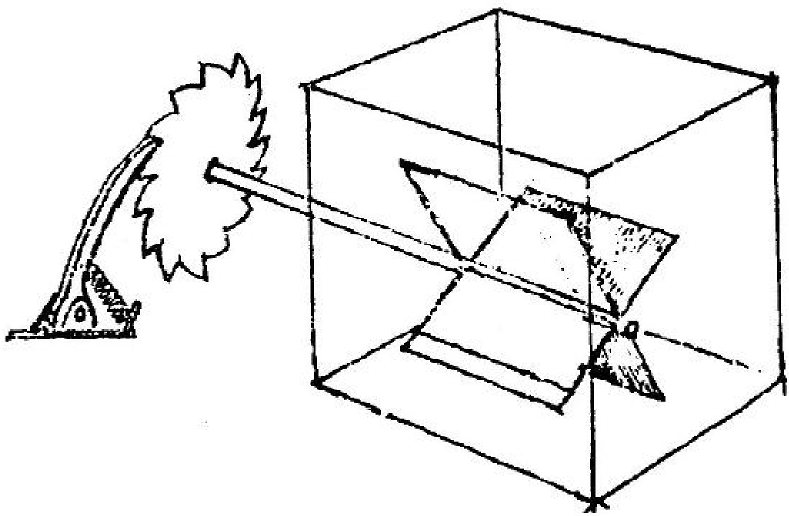


图27

这同环绕着各个叶片的气体的温度有什么关系呢？假定我们根本没有那个部件，那么，如果轮子由于棘爪落到一个齿的倾斜面上而被推动了的话，接着要发生的一件事就是齿的垂直边会弹跳起来离开棘爪，轮子就会弹跳回去了。为了防止轮子弹跳回去，我们在它上面装一个阻尼器，并且把各个叶片放在空气中，因此它会迟缓下来，不再自由地弹跳。那么它就会单方向转动了，不过是按错误的方向，于是结果就明白了，不管你怎么样设计它，如果一边比较热，轮子就会朝一个方向单方向转动，而如果另一边比较热，轮子就会朝另一个方向单方向转动。但

在两边之间发生热交换之后，一切都平静下来了，因而叶片和轮子都处在同一温度，按照平均的效应，它不再朝一个方向转动，也不再朝另一个方向转动。这就是只要存在着不平衡，只要一边比另一边平静一些，或者一边比另一边更蓝一些，自然现象就会按照一种技术性方式单方向发生。

能量的守恒会令人想到，我们想要多少能量就可以有多少。自然界永不损失也不增殖能量。然而，例如海洋的能量，在海水里所有原子热运动的能量，实际上是不能够被我们利用的。为了使得那种能量组织起来，集合起来，以至于可以被我们所利用，需要存在一种温度上的差别，否则我们将会发现虽然有能量而我们不能够利用它。能量与能量的可利用性之间存在着巨大的差异。海水含有非常大量的能量，但无法被我们所利用。

能量的守恒意味着世界的总能量保持相同的数量。但在不规则的摇晃之中，那种能量能够在某种情况下分布得那么均匀，使得没有办法使过程朝某一方向而不是另一方向进行，没有办法对过程的方向实施任何控制。

我想通过一种比拟能够对这种困难给出一点说明。我不知道你是否有过这样的经验——而我是有过的——拿着几条毛巾坐在海滩上，突然下起了倾盆大雨。你尽快地抓起那些毛巾，跑到更衣室里去。于是你开始擦干你自己，然后你发现这条毛巾有一点湿了，但它还是比你的身体要干。你继续用这一条毛巾擦身，直到你发现它湿透了——它在擦干你的同时也在打湿你，打湿的水分同擦干的一样多——于是你就换另一条毛巾来用；过了不多久你就发现一件可怕的事情——所有的毛巾都弄湿了，同你一样湿。即使你有许多条毛巾，也没有办法变得更干了，因为那些毛巾湿得同你自己一样，润湿的程度没有差别。我想发明一个量，我叫它做“除掉水分的难易程度”。毛巾具有同你一样的除水难易程度，因而当你用毛巾擦拭你自己的时候，从毛巾流向你的水分同从你流向毛巾的水分一样多。那并不意味着在毛巾上和在你身上的水一般多——一条大毛巾比一条小毛巾蓄存的水更多——但它们具有同样的湿润程度。当样样东西都达到了相同的湿润程度时，你做任何事情都是无济于事的。

现在，水就好像能量一样，因为水的总量是不变的。（如果更衣室的门敞开着，并且你能够跑到阳光下面去晒干，或者找得到另一条毛巾，那你就可以脱离困境了，但我们假定什么东西都是关起来的，并且你不能够丢掉这些毛巾或者得到任何新的毛巾。）同样地，如果你设想世界的一部分是封闭的，并且等待足够长的时间，那么在世界上发生的各次偶然事件中，能量像水一样会均匀地分布到所有各个部分，直到没有什么东西是单方向变化的了，世界上再也没有什么我们经历到的东西会激起真正的兴趣了。

因而，在棘轮和棘爪以及叶片的这个不涉及其他东西的局限情况

中，两边的温度渐趋相同，而轮子不再朝一边也不再朝另一边转动。同样的情况是，如果你足够长久地不触动任何系统，它就会使得其中的能量完全混合起来，于是没有什么能量是真正可以用来做任何事情的了。

顺便提到，对应于润湿度或者“除掉水分的难易程度”的那个量叫做温度，虽然我说当两个东西温度相同时就达到了平衡，那并不意味着两者所含的能量相同；那只是意味着从一件东西提取能量是与从另一件东西提取能量同样容易的。温度就像是一种“取用能量的难易程度”。因而如果你把两件这样的东西靠着放在一起，表面上看来什么也没有发生；它们互相之间传递等量的能量，但净的结果是零。因此，当每件东西都具有相同的温度时，就再没有什么能量可以用来做任何事情的了。不可逆性的原理是，如果不同的东西处在不同的温度，并且让它们自己留在那里，那么在时间流逝和过程中，它们就会变得越来越趋于同一温度，而能量的可利用性则总是在减小。

这一规律是所谓熵增加定律的另一个名称，它说的是熵总是在增加着。但绝不要计较那些术语；用另一种方式表达，能量的可利用性总是在减小。而那是这个世界的一种特征，这指的是它是由于分子不规则运动的混乱所导致的结果。如果不触动一些不同温度的东西，那么它们就会趋于相同的温度。如果你有两件处在相同温度的东西，就像一锅水和一个没有点火的普通炉子，那么水不会凝结而炉子也不会变热。但如果你有一个火热的炉子和一块冰，那就会是别的样子了。因而单方向性总是同能量可利用性的损失联系在一起的。

以上就是我对这个题目所要讲的全部内容，但我还想要对有关的一些特征做几点说明。我们这里有一个例子，其中一种明显的效应，不可逆性，不是物理学定律的一种直接结果，而事实上是离开那些基本定律相当远的。要通过一大套分析才能明白它的理由。这种效应对于世界经济，对于世界上所有明显表现出来的事物的实际行为，都是有头等重要意义的。我的记忆，我的特性，过去和将来之间的差别，都深深地同它相关，然而对它的理解并不是了解了那些定律就可以轻易达到的。要通过一大套分析才做得到。

常常有这样的情况，物理学定律并不具有一种与经验明显的直接相关性，但它们是在不同的程度上从经验抽象出来的。在这一特殊的情况下，定律是可逆的而现象并不如此，这就是一个例子。

在具体的定律同真实现象的主要方面之间，常常有巨大的差距。例如，如果你从远距离观看一道冰河，看到一些巨大的石块跌落海里，看到冰块漂移的方式，如此等等，那么记不记得它是由一些微小的六角形冰晶组成的似乎是无关紧要的。虽然如果在这方面懂得了足够的知识，那么冰河的运动事实上是六角形冰晶的特性的结果。但要花费许多时间来了解冰河的所有行为（事实上还没有人对冰有充分的了解，尽管他们对晶体研究得那么多）。然而，希望在于，如果我们确实了解了冰的晶体，我们就终将了解冰河的一切。

事实上，虽然我们在上面的几讲里谈到了物理学定律的基本性质，我还是必须立刻说，我们通过掌握了我们今天所知道的各种基本定律，还是不能够直接地得到对于更多的任何东西的了解。那需要花费时间，并且即使那样，也只能得到部分的了解。事实上，自然界看来是这样设计的，真实世界中最重要的东西，看起来就像是一大批定律共同起作用的一种复杂的偶然结果。

说说一个例子，含有质子和中子等几种核粒子的原子核是非常复杂的。它们具有我们称之为能级的状态，也就是说它们可以处在不同能量值的一些状态，而不同的原子核具有不同的能级分布。要求出各个能级的位置是一个复杂的数学问题，我们今天仅仅能够部分地解决这一问题。各个能级的准确位置显然是一种极为复杂的机制的结果，因而，例如含有15颗核粒子的氮核，恰好具有2.4兆电子伏特的一个能级和7.1电子伏特的另一个能级等的这一事实，并没有什么特别的神秘。但是，关于自然界的一件惊人的事情是，整个宇宙在它的特性上，精确地依赖于宇宙特别的原子核的一个特定的能级的位置。在C^{12}核里，碰巧有一个7.82兆电子伏特的能级。而且它制造了世界上的一切差别。

事情是这样的。如果我们从氢开始，并且看起来世界在开始的时候事实上全部都是氢，然后当氢核在引力作用下碰到一起，并且变热了，就会发生核反应，于是就能够形成氦核，然后氦又仅仅能够部分地同氢结合而产生另外几种稍微重一点的元素。但这些较重的元素马上又发生蜕变，变回了氦。因而有一段时期，关于世界上所有其他元素是从哪里来的成为了一个巨大的奥秘，因为在恒星内部从氢开始的那个大熔炉的过程中，不会产生许多氦和其后的五六种轻元素。面对这一状况，霍依尔和萨尔皮特教授[36]说，有一种方法可以破解这个难题。如果三个氦原子能够结合到一起形成碳，我们就能够容易计算出那种过程在一颗恒星里发生的机会。结果表明，它是永远不会发生的，除非满足一种可能的巧合条件——如果碳核刚好有一个7.82兆电子伏特的能级，那么三个氦原子就会碰到一起，并且在它们分开之前停留在一起的时间，会比如果没有这个7.82兆电子伏特的能级的平均停留时间长一点。而当它们在一起停留得稍微长久一点，就会有足够的时间发生别的什么事，产生别的元素。如果碳核有一个7.82兆电子伏特的能级，那么我们就能够明白周期表里的所有其他元素是从哪里来的了。于是，通过倒推，即颠倒过来的推理，预言出碳核有一个7.82兆电子伏特的能级；后来在实验室里证明了确实如此。因此，世界上所有这些其他元素的存在，密切依赖于碳的这一特定的能级。但在知道了物理学定律的我们看来，碳的这一特定能级乃是12个粒子复杂相互作用的一种非常复杂的巧合。这是一个极好的实例，说明了这样的事实，了解了物理学定律，你并不一定就能够直截了当地明白世界上各种事物的意义。真实事物的经验细节，往往同基本定律离得很远。

当我们谈到各种等级体系或者不同的层次时，我们就有了讨论世界的一种方式了。噢，我不是说要十分精确地把世界划分为一些确定的层次，但我要通过描述一组概念来指出，我说的概念的等级体系是什么意

思。

例如，我们在一头掌握了物理学的各种基本定律，然后我们发明了代表一些近似概念的术语，而我们相信它们是能够用基本定律来给出最终解释的。例如，热。热被假定为原子的无规则运动，而讲一个热的物体的热，指的正是大量原子在做无规则运动的那种热。不过当我们谈论热时，有时候忘记了那些原子的无规运动——正如当我们谈论冰河的时候并不总是想到六角形的冰晶以及起初飘落的雪花。同样的事情的另一个例子是一颗食盐晶体。从基本的观点看，它是一大堆质子，中子和电子；但我们有这个“食盐晶体”的概念，它已经承载了有关基本相互作用的整个样式。像压强这样的观念也是一样的。

现在如果我们从这里往上站得更高一些，在另一个层次上我们有了物质的性质——例如代表当光通过某种物质分界面时偏折性质的“折射率”；或者代表水倾向于把它自己聚拢来的“表面张力”，两者都是用数来描写的。我提醒你，我们得要通过几条基本定律才能看出它来自原子间的拉力，如此等等。但我们仍然在说“表面张力”，并且在讨论表面张力的时候不必顾及水液内部的机制。

我们继续往上走到等级体系的更高一个层次。水会形成波浪，而且我们还有像一次风暴那样的东西，“风暴”这个名词代表了许许多多的一批现象，或者一个“太阳黑子”，或者“恒星”，它们都是许多事物的累积。总是想把那些现象回溯到基本的层次，未必是有意义的。事实上我们也做不到，因为我们要升到的层次愈高我们就要经过愈多的中间步骤，而其中每一个步骤都把其中的联系减弱了一点。并且，我们还没有把那些步骤全部想清楚。

当我们在这个复杂性的等级体系中再往上走的时候，我们还会遇到像肌肉抽搐，或者神经脉冲之类的东西，从物理世界的角度看乃是极端复杂的，涉及一种非常精巧而复杂的物质组织形式。于是就会有像“青蛙”那样的东西。

我们接着往上升，我们就会遇到像“人”和“历史”，或者“政治权术”之类的名词和概念，等等，这是我们用来在一个更高的层次上理解事物的一系列概念。

继续往上升，我们就会遇到恶，美和希望……

如果我可以使用宗教上的隐喻的话，哪一头更接近上帝呢？美和希望，还是基本的定律？我想那正确的回答当然是说，我们要看的是事物的整体结构性的相互联系；所有的科学，并且不仅是科学还有所有各种知识的成果，都是为了看到体系中的各个等级之间的联系的努力，包括美同历史的联系，历史同人类心理的联系，人类心理同大脑功能的联系，大脑和神经脉冲的联系，神经脉冲同化学的联系，如此等等，在各个层次中既要上升亦要下降，做出双向的观察。我们今天还不能够从这

一事物的一端用心画出一条线，指明同其他东西联系的种种方式，并且即使相信我们能够做得到也没有用，因为我们只是刚刚开始看到了有这样的一种相关的等级体系。

而我不认为有哪一头更接近上帝。无论站在哪一头，然后只是离开这道堤岸的这一头，期望沿着那个方向就可以得到完全的理解，不过是一个错误的想法。站在恶和美以及希望这一头，或者站在基本定律这一头，期望只凭这种方式就能够得到对整个世界的深入理解，也是一种错误的想法。一些人专注于一头，而另一些人则专注于另一头，并且互相漠视对方，那也是不明智的。（实际上他们并不那样，但人们总说他们是那样的。）绝大多数的工作者，包括在两头的和在中部的工作者们，他们处在两个层次的中间，把一个层次同另一个层次联系起来，正在全力地增进我们对世界的理解，通过这种方式，我们就能够逐渐理解由互相联系着的各种等级体系构成的这个惊人复杂的世界。

第六章　概率和不确定性——对自然界的量子力学观点

在实验观察的历史，或者对科学事物的其他种类观察的历史的开端乃是直觉，它实际上是以对日常生活所遇到的各种对象的简单经验为基础的，并对那些事物作出了合乎常理的解释。但当我们试图开阔眼界，并且要使得我们对我们所看到的东西做出更加一致的描述的时候，当我们眼界越来越开阔并且看到了一个更大范围内的各种现象的时候，那些解释就从简单的解释变成我们称之为定律的东西了。一种奇异的本性是，那些解释或者定律常常变得越来越不合常理，以及凭着直觉越来越难以弄明白了。举一个例子，在相对论里有这样的命题，如果你认为两个事件在同一时间发生，那不过是你的看法而已，别的什么人则会判定那两个事件的一个是在另一个之前发生，因而同时性仅仅是一种主观的印象。

我们没有什么理由期望事情要按另一种方式发生，因为日常生活的经验都牵涉到庞大数目的粒子，或者牵涉到很缓慢地运动着的东西，或者受到其他一些特殊的条件的约束，并且事实上仅代表了关于自然界的局部经验。我们从直接经验认识到的只是自然现象的一小部分。只有通过精心的测量和细致的实验，我们才能够拥有更广阔的视野。然后我们就会看到意想不到的事物：我们看到的东西远不是我们所能够猜想得到的——远不是我们原来想象得到的。我们的想像力伸展到了极度，那不是像在小说里那样想象一些现实中不存在的东西，而只是去理解存在着的那些东西。我想要讨论的就是这一类情况。

让我们从光的历史开始。首先假设光的行为非常像一簇粒子或者一簇微粒，就像天上掉下来的一滴滴雨点或者从枪支里发射出来的一颗颗子弹那样。后来，经过进一步的研究弄明白了那是不对的，实际上光的行为像波，例如像水波那样。再后来到了二十世纪，更进一步的研究发现，实际上光在很多方面的行为是像粒子那样的。在光电效应里你可以一个个地数出这些粒子，现在把它们叫做光子。最初发现电子的时候，它们的行为简单得就像一些粒子或者子弹那样。后来，根据例如电子衍射实验那样的进一步研究表明，它们的行为就像波那样。随着时间的推移，在关于这些东西真的像什么——像波还是像粒子，或者像粒子还是像波的问题上，产生了愈演愈烈的混乱。每一样东西都既像这个，又像那个。

在1925年或者1926年量子力学的正确方程出现之际，就结束了这一场越来越混乱的局面。现在我们知道电子和光是怎么样运动的了。但是我们应该怎么样描述它们呢？如果我说它们表现得像粒子，我就给出了一个错误的印象；如果我说它们表现得像波，那也是错的。它们按照它们本身的一种无可比拟的方式运动着，在技术上可以把那种方式称为

量子力学方式。它们的行为方式不像你们以前看见过的任何东西。你们以前看到过的所有东西的经验是不完全的。在一个非常微小的尺度上的东西的行为简直是完全不同的。一个原子的行为不像悬在一根弹簧上振动着的一个重物。它也不像一个小型的太阳系，其中有一些微小的行星在轨道上运行。它看起来也不像环绕着原子核分布的某种云雾。它的行为不像你曾经看到过的任何东西。

这里至少有一种简化的认识。电子在这一方面的表现，与光子是完全相同的；它们都是古怪的，但以完全相同的方式运动。

因而，我们要做出大量的想象才能弄明白它们是怎么样运动的，因为我们要描述的是同你以往熟悉的任何东西都不相同的对象。由于这一缘故，这一讲是我这一系列讲座里最困难的了，因为它是抽象的和远离经验的。我无法逃避这一困难。假使我在讲述物理定律的本性这一系列的讲座中冲不了掉关于在微小尺度上的粒子的实际行为的描写，我肯定不会来做这件事。这完完全全是自然界里所有粒子的特征，并且是一种普遍的特征，因而如果你要想听听物理定律的本性，讲一讲这个特殊的方面就是非常重要的。

这将会是困难的。但这种困难其实只是一种心理学上的困难，是由于你老是用“但是它怎么会像那个样子呢？”的问题来折磨自己，要按某种熟悉的观念去看待它的一种不由自主可是完全徒劳的愿望的反映。我不会用与某种熟悉的东西的类比来描述它；我将简单直接地描述它。曾经有一段时间，报纸上说只有十二个人懂得相对论。我不相信真的有那样的一天。可能会有一段时间，只有一个人懂得相对论，因为在他写出他的论文之前，他是掌握它的惟一的一个家伙。但当人们读到了那篇论文，就会有好些人以这样那样的方式理解了相对论，肯定不止十二个人。另一方面，我想我可以放心地说，没有谁理解量子力学。因而，不必太认真地对待我这一讲座，觉得你真的通过我所描述的某种模型弄懂了什么，你自由自在地欣赏它好了。我将要告诉你，自然界的行为像什么样子。如果你能简单地接受自然界的行为可能就像这个样子，那你就会发现她多么令人愉悦和喜爱。如果你有可能避免的话，不要总是问你自己“但是它怎么会像那个样子呢？”因为那样就会使得你陷进去，钻入一个谁也逃不出来的死胡同里去。谁也不知道它怎么会像那个样子。

好了，现在让我来对你们描述电子和光子以它们典型的量子力学方式所表现出的行为。我要通过类比和对比的混合来做这件事。如果我纯粹用类比来做，我会失败；它必须使用对你所熟悉的东西的类比和对比。因而我通过类比和对比来做这件事，首先讲的是粒子的行为，我将使用子弹做例子；然后讲的是波的行为，我将使用水波做例子。我要做的是设想一种特殊的实验，并且首先告诉你在那个实验里使用粒子会是什么样的状况，然后如果用波做实验你会期望发生什么样的结果，最后当在实验系统里实际做实验的是电子或者光子的时候，又会发生什么样的状况。我将只举出这一个实验，它的设计里已经包含了量子力学的所有奥秘，把你带到那些佯谬和奥秘以及自然界的百分之一百的特点面

前。结果表明，对于量子力学里的任意其他情况，总是能够通过说这句话来得到说明：“你记得有两个小孔的实验的情况吗？那是同一回事。”我要告诉你的是关于有两个小孔的实验的情况。它确实包含着普遍性的奥秘；我不回避任何事情；我把自然界以她的最精致和困难的形式揭露出来。

我开始用子弹做实验（图28）。假定我们有某种发射子弹的源，一挺机关枪，在它前面有一块开了一个可容子弹穿过的孔洞的板子，并且这是一块能抵挡子弹的装甲板。离它相当远处有第二块板子，它的上面有两个小孔——那就是著名的双孔实验装置了。我要对这两个小孔讲得很多，所以我把它们分别叫做孔1和孔2。你可以想象在三维空间里它们是两个圆形的孔洞，图中画出的只是一个横截面。再离它相当远处我们有另一块屏板，它不过是某种挡板，在它上面我们可以在各个不同的部位安放一个探测器，在子弹射击的情况下那就是一个沙箱，子弹会陷入其中，我们就可以对它们计数了。在我要做的实验里，把这个探测器或者沙箱先后放到不同的位置上，我分别数出有多少颗子弹落入沙箱，并且为了描述观察的结果，我要测量出沙箱离开某一处的距离，而且把这一距离叫做“x”，然后我就谈论当你变动“x”的时候会有什么样的结果，而“x”指的仅仅是你把探测器的箱子上下移动的位置。首先我要对实际的子弹做几点改动，使三个方面理想化。第一，机关枪不停摇摆扫射，使得子弹沿着不同的方向射出，而不是仅仅精确地沿着一条直线射出；子弹也可以在装甲板的小孔边沿上发生弹跳。第二，我们要说，虽然这一点不是非常重要，就是子弹都具有相同的速率或者能量。在这种情况下与实际的子弹不同的最重要的理想化之点是，我要求这些子弹都是绝对不可损毁的，使得我们在沙箱里头找到的不是一些铅屑，不是破碎得只有半颗的子弹，我们得到的都是完整的子弹。请想象一些不可摧毁的子弹，或者坚硬的子弹和柔软的挡板。

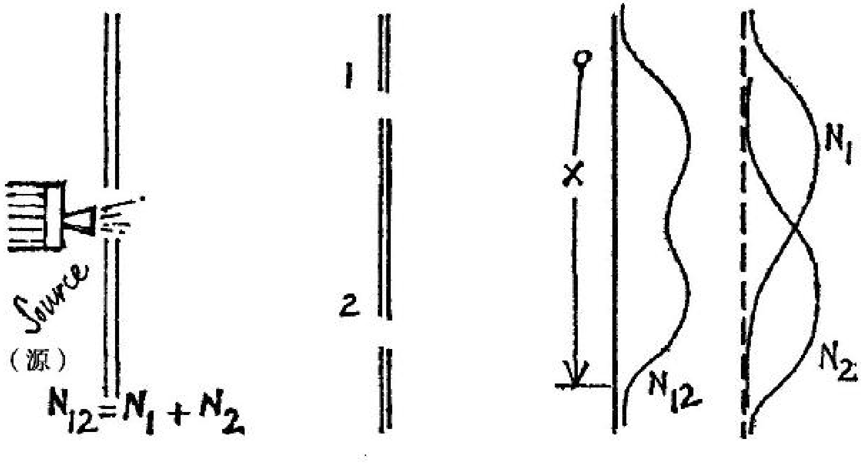


图28

关于子弹我们要指出的第一点是，这些东西是一整个一整个地到达的。当能量爆发的时候，它集中在一颗子弹上面，砰的一声射出来了。如果你数那些子弹，有一颗，两颗，三颗，四颗子弹；这些东西是一整个一整个地来到的。你假定，在这种情况下，它们有相同的大小，并且当一颗子弹来到的时候，它要就全部落入沙箱里面，要就不在沙箱里面。此外，如果我放置两个沙箱，那么我绝不会在同一时刻在这两个沙箱里得到两颗子弹，只要那挺机关枪发射得不太快，并且我在两发子弹之间有足够的时间来分辨。让那挺机关枪射击得很慢，然后非常快地察看那两个沙箱，你绝不会在同一时刻在这两个沙箱里得到两颗子弹，因为一颗子弹是一个单独的可分辨的整体。

现在我要测量的是，在一段时间里，平均有多少子弹到达。比方说我们守候一小时，然后我们数出有多少子弹落在沙箱里，再取平均。我们取每小时里到达的子弹的数目，然后可以把它称为到达概率，因为它正代表着一颗子弹穿过一条狭缝抵达一个特定沙箱的机会[37]。当我改变距离“x”的时候，到达沙箱里的子弹数目当然会发生变化。在图上，我在距离“x”的方向上标出，如果我把沙箱放在每一个位置上一小时，我会得到的子弹的数目。结果我将会得到一条曲线，看起来多少就像曲线N_{12}那样，因为当沙箱正对着那些小孔时它会得到许多子弹；而如果放得有点偏了，它就不会得到那么多子弹，因为那些子弹需要在小孔的边沿上反弹才会走偏；最后，当沙箱移远时曲线就消失了。曲线看起来像图上的曲线N_{12}那样，我们把当两个小孔都开启时在一小时里得到的子弹数目叫N_{12}，指的是穿过孔1和孔2到达的子弹数目。

我必须提醒你，我在图上标出来的数字并不是整数。它可以是随便多大的数。它可以是在一小时里两颗半子弹，尽管事实上子弹是一整个一整个地到达的。我说的每小时两颗半子弹，指的是如果你等候十小时，你会得到二十五颗子弹，因而平均说来每小时就是两颗半了。我肯定你们都熟知这样的笑话，说的是在美国每个家庭平均有两个半孩子。那并不意味着在任何一个家庭里有半个孩子，孩子都是一整个一整个的。无论如何，当你取每个家庭的平均数时，得到的可以是无论什么样的数字，而对现在这个数字N_{12}也是一样的，它是每小时落到容器里的子弹数目的平均值，不必是整数。我们测量的是到达的概率，它是一个技术性名词，指的是在一段给定长度的时间内到达的平均数目。

最后，如果我们对曲线N_{12}进行分析，我们可以恰好把它解释成两条曲线之和，其中一条曲线我叫做N_1，它代表的是孔2被在前面加上的一小块装甲板封闭的情况，另一条曲线是N_2，它代表的是孔1被封闭，只能够从孔2穿过的数目。现在我们发现了一条十分重要的定律，说的是两个小孔都开启的时候得到的数目就是穿过孔1到达的数目加上穿过孔2到达的数目。这一命题，事实上你必须做的全部就是把它们加在一起，我称之为“无干涉”的情况。

$$N_{12} = N_1 + N_2 \text{（无干涉）}$$

这是对子弹的结果，现在我们重新开始做对子弹做过的事情，这回用的是水波（图29）。现在的源是一大块物料，沉入水中不断摇动。装甲板换成一串驳船或者防波堤，中间开有一道可容水进出的缝隙。或许用细密的波纹比用巨大的海浪来做会更好一些；它听起来更加合理。我用我的手指上下扰动以制造水波，并且我有一小块木头作为一种障碍物，它上面开了一个小孔，可容波纹通过。然后我有第二块障碍板，它上面开有两个小孔；最后有一个探测器。我们用探测器做什么呢？探测器探测的是水晃动的程度。例如，我放一块软木在水面上，然后测量它上下运动的幅度，我们这样测量的事实上就是软木块抖动的能量，它准确地正比于水波所携带的能量。还有另外一点：这种晃动是非常规则和理想的，使得一个一个波纹之间的间隔都是相同的。对水波来说有一点是十分重要的，那就是我们要测量的东西能够有完全任意的大小。我们正在测量波动的强度，或者在软木块上的能量，而如果波动是十分平静的，如果我的手指头仅仅轻微地扰动，那么软木块就只有非常轻微的运动。无论它运动的幅度是多大，它的能量都是同水波的能量成正比的。它可以有任意的大小；它不是一整个一整个地到来的；它完全不是要就有一个要就什么也没有。

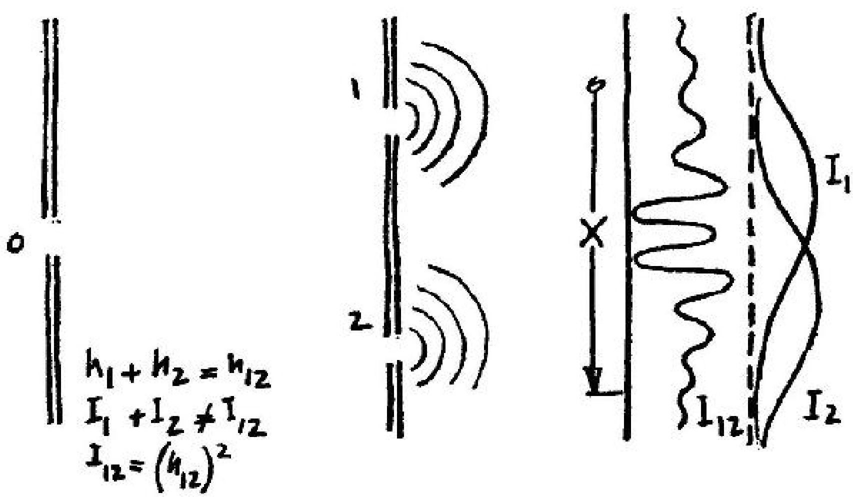


图29

我们正在测量的是波动的强度，精确地讲，是在一点上波动所产生的能量，如果我们测量这一强度会发生什么情况呢？我把这一强度称为“I”[38]，以提醒你它是一种强度而不是任何种类的粒子的数目。在图29上画出的曲线I_{12}是当两个小孔都开启时的结果。它是一条有趣的，看起来颇为复杂的曲线。如果我把探测器先后放在不同的位置上，我们就得

到一条以一种特定方式强烈起伏的强度曲线。你们可能熟悉那种结果的原因。原因是到达的波纹有一部分是从孔1传过来的波峰和波谷，有一部分是从孔2传过来的波峰和波谷。如果我们所处的位置刚好在两个小孔的中间，使得从两处传来的波动同时抵达，那么那些波峰会一个加到另一个的顶上，于是就会产生更强烈的抖动。在正中心之处，就会有种猛烈的扰动。另一方面，如果我把探测器移到离孔2比离孔1更远的某一点上，那么从孔2传过来的波动就要比从孔1传过来的波动稍为晚一点，于是当从孔1传来一个波峰的时候，从孔2来的波峰还没有抵达，事实上也许从孔2来的是一个波谷，使得当水要向上涨的时候它又要向下落，在来自两个小孔的波动的共同影响下，合成起来的结果是它完全不运动，或者实际上什么也没有发生。因此我们在这一处得到的是一个低凹点。然后，如果我们继续把探测器拿远一些，我们就会得到足够的延迟，使得来自两个小孔的波峰又相会在一起了，虽然有一个波峰事实上落后了整整一次波动，这样你就再次得到了一个凸出点，然后再是一个低凹点，一个凸出点，一个低凹点……这都取决于那些波峰和波谷"干涉"[39]的方式。在科学上再一次以一种别致的方式使用干涉这个名词。我们能够有我们称为相长干涉的方式，那指的是两列波动的干涉使得强度增加了的情况。重要的事情是I_{12}不再是I_1加上I_2，而我们说它表示了相长和相消的干涉。我们能够通过封闭孔2得到I_1，而封闭孔1得到I_2来看出I_1和I_2是什么样子。如果我们封闭了一个小孔，所得到的强度简单地就来自一个小孔通过的波，其中没有干涉，这些曲线都在图29上表示出来了。你会注意到I_1与N_1是相同的，而I_2与N_2是相同的，但I_{12}则与N_{12}大不相同。

事实上，曲线I_{12}的数学形式是相当有趣的。真实的情况是，我们把水的高度称为h，那么当两个小孔都开启的时候水的高度h_{12}，等于从孔1开启时你得到的高度h_1，加上从孔1开启时你会得到的高度h_2。那么，如果从孔2来的是一个波谷，水的高度就是负值，会抵消掉从孔1来的高度。你可以通过谈论水的高度来表示它，但结果表明，无论在什么情况下，例如在两个小孔都开启的情况下，强度的关系与高度是不一样的，它是同高度的平方成正比的。正是由于我们处理的是一个数的平方这一事实，我们才会得到这些非常有趣的曲线。

$$h_{12} = h_1 + h_2$$

但

$$I_{12} \neq I_1 + I_2 \text{（干涉）}$$

$$I_{12} = (h_{12})^2,$$

$$I_1 = (h_1)^2$$

$$I_2 = (h_2)^2$$

这是水的情况。现在我们重新开始，这回讲的是电子（图30）。

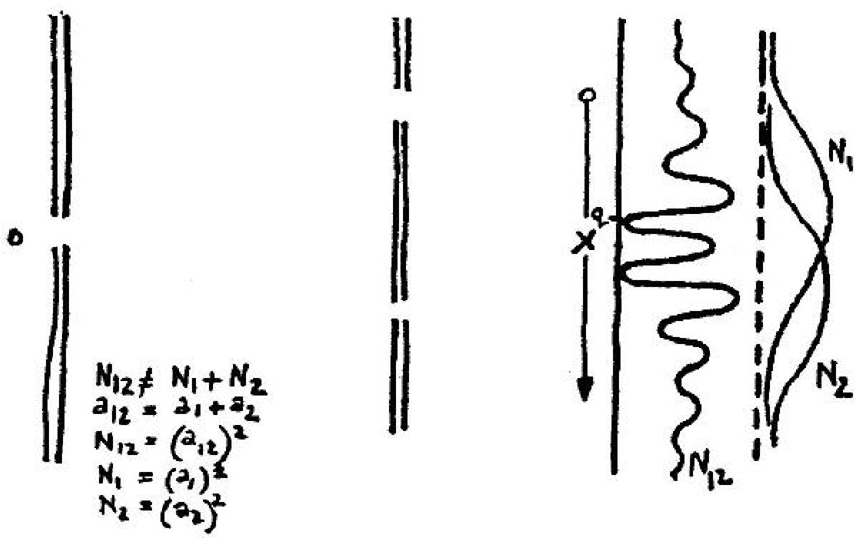


图30

电子的源是一条炽热的灯丝，并用钨板来做挡板，在钨板上钻了一些小孔，探测器用的是任何有足够灵敏度能够检测出一个到达电子的电荷的电学系统，而不管源的能量有多大。如果你愿意的话，我们可以换用光子来代替电子，用黑色的硬纸来代替钨板——事实上黑纸不很理想，因为纸张的纤维使我们得不到界线分明的孔洞，因而我们要用好一点的东西——而探测器则使用一只光电倍增管以探测单个光子的到达。电子和光子的情况都会发生些什么事呢？我将限于只讲电子的情况，因为光子的情况是完全相同的。

首先，当在电子探测器后面接上一台足够强大的放大器，我们接收到的是咯拉咯拉的声响，是一些整个的信号，绝对是整个的。当咯拉一声来到的时候它有某种大小，而声响的大小总是一样的。如果你把电子的源调节得弱一些，那些咯拉声会变得稀疏一些，但它们仍然是同样大小的声响。如果你把源调节得很强，信号会来得很快，以至于放大器被堵塞住了。所以你要把它调节得足够弱，使得对于你的探测器所使用的机制说来，不出现太频密的信号。其次，如果你放另一台探测器在一个不同的位置上，然后倾听两者的信号，你绝不会在同一时刻听到两声咯拉，至少是在源足够弱并且你测量时间的精密度足够高的情况下。如果你把源的强度降下来，使得电子到来得少并且一个一个隔得很开，它们就绝不会一次在两个探测器里给出一声咯拉。那意味着电子是整个地到达的——它有确定的大小，并且在一个时刻仅仅来到一处位置上。好了，电子或者光子都是一整个一整个地到达的了。因此我们能够做的事，同我们对子弹所做过了的事是一样的；我们能够测量到达的概率。我们要做的是把探测器放到各个不同的位置上——实际上如果我们不怕花钱的话，我们可以同时用许多探测器放满接收电子的屏板，就可以在瞬时间得到整条曲线——但我们的方法是把探测器先后放到各个位置上，在每一处停留譬如一小时，然后我们测量在一小时结束时有多少电子抵达，我们再对它平均。我们得到的到达电子的数目是怎么样的呢？是与用子弹做实验时所得到的N_{12}那种类型的曲线吗？图30表示出我们所得到的N_{12}曲线是怎样的，那是我们在两个小孔都开启的时候所得到的。那是自然界的现象，它所产生的曲线与你在水波的干涉中所得到的相同。它所产生的曲线代表什么？它代表的不是波动的能量，而是这些一颗一颗的电子当中的一个的到达概率。

其中的数学是简单的。你把I换成了N，那么你也要把h换成别的什么东西，它是一个新的量——它不是什么东西的高度——因而我们发明了一个“a”，我们称之为概率振幅，因为我们不知道它是什么意思。在这种情况下，a_1是电子通过孔1到达的概率振幅，而a_2是电子通过孔2到达的概率振幅。为了得到总的概率振幅，你要把两者加在一起再平方。这是从对波动的描写那里直接模仿过来的，由于我们要得到同样的曲线，因而我们也要用同样的数学方法。

然而，我应当对干涉再讲清楚一点。我还没有说如果我们封闭了小孔当中的一个，会发生些什么事。让我们假定电子是穿过一个小孔或者穿过另一个小孔来到的，并尝试这样来分析这条有趣的曲线。我们先封

闭一个孔，然后测量有多少电子穿过孔1来到，于是我们就得到了一条简单的曲线N_1。或者我们封闭另一个孔，然后测量有多少电子穿过孔2来到，于是我们就得到了另一条曲线N_2。但这两种情况加在一起并不给出与N_1+N_2相同的曲线；它确实表现出干涉。事实上，数学关系是由一道有趣的公式给出的，即到达概率是一个振幅的平方，而这个振幅本身又是两部分的和，$N_{12}=(a_1+a_2)^2$。问题是它怎么能够当电子通过孔1时有一种形式的分布，而当电子通过孔2时又会有另一种形式的分布，但当两个小孔都开启的时候你所得到分布的并不是两者之和。例如，如果当两个小孔都开启时我把探测器放在图上的q点，那么实际上我什么也没有接收到，虽然如果我封上两个小孔当中的一个，我会得到许多电子，并且如果我封上另一个小孔，我也得到不少。我让两个小孔都打开的时候什么也得不到；我让它们通过两个小孔过来，而它们却一颗也过不来。或者我们再取图上的中心点；你能够证明在那一点上的曲线高于两条单个小孔的曲线之和。为了解释这一现象，你也许会这样想，如果你足够聪明你就能够论证说，那些电子会以某种方式在那些小孔前后来回穿插，或者它们会做某种更加复杂的事情，或者一个电子分裂成两半然后各自穿过一个小孔，或者类似的什么东西。然而，没有人成功地提出过令人满意的解释，因为所用到的数学终究是十分简单的，曲线也是十分简单的（图30）。

那么，我要总结说，电子是一整个一整个地到来的，就像粒子那样，但这些一整个一整个地到达的概率，是如同波动的强度那样决定的。正是在这种意义上说，电子的行为有时候像粒子而有时候像波。它在同一时间表现出两种不同的行为（图31）。

我要讲的都讲了。我还可以给出一种数学描述，告诉你们怎么样求出电子在任何状况下的到达概率，而在原理上就是这一讲的结束了——只是还有涉及自然界以这种方式运作的几个微妙之处。有几件特殊的事情，而我想要讨论这些特殊性，因为它们在这方面不一定是不言而喻的。

为了讨论这些微妙之处，我们从讨论一条命题开始，我们本来会以为它是合理的，因为这些东西是一整个一整个的。在电子的情况下，由于到来的总是一个完整的电子，一种明显合理的假定就是，一个电子要么就通过孔1，要么就通过孔2。看起来非常明显，如果它是一整个的话，它就不可能做出另外的行为。我要来讨论这条命题，因而我给它起个名称，我把它叫做“命题A”。

TABLE

BULLETS	WATER WAVES	ELECTRONS (PHOTONS)
COME IN LUMPS	CAN HAVE ANY SIZE	COME IN LUMPS
MEASURE PROBABILITY OF ARRIVAL	MEASURE INTENSITY OF WAVES	MEASURE PROBABILITY OF ARRIVAL
$N_{12} = N_1 + N_2$	$I_{12} \neq I_1 + I_2$	$N_{12} \neq N_1 + N_2$
NO INTERFERENCE	SHOWS INTERFERENCE	SHOWS INTERFERENCE

表

子弹	水波	电子（光子）
一整个一整个地到达	可以有任意大小	一整个一整个地到达
测量到达的概率	测量波的强度	测量到达的概率
$N_{12}=N_1+N_2$	$I_{12}\neq I_1+I_2$	$N_{12}\neq N_1+N_2$
无干涉	表现出干涉	表现出干涉

图31

命题A

一个电子要么通过孔1，要么通过孔2。

现在我们已经初步讨论过当命题A成立的时候会发生些什么事。假若一个电子真的是要么通过孔1，要么通过孔2，那么到达的电子总数应当可以分成两部分贡献之和。到达的总数将会是通过孔1来的数目加上通过孔2来的数目。由于结果得到的曲线不能够按这样一种直接的方式简单地分析成两部分之和，并且由于测定在如果只有一个小孔或者另一个小孔也开启的情况下有多少电子到达的实验并不给出总数是这两部分之和的结果，那么我们显然要下结论说这条命题是错的了。如果电子要么就通过孔1要么就通过孔2是不对的，或许它自己暂时分成两半或者别的什么东西。那么命题A错了。那是逻辑。不幸的是，或者说幸好我们能够通过实验来检验逻辑。我们要查明电子要么就通过孔1要么就通过孔2究竟对不对，或者也许电子会同时穿过两个小孔并且暂时分裂开

来，或者别的什么东西。

Proposition. A.

Either an electron goes through hole N°1 or it goes through hole N°2.

我们要做的只是观察它们。并且为了观察它们，我们需要光照。因而我们在两个小孔的后面放上一个非常强的光源。光会被电子散射，从电子处反弹开来，因而如果光足够强，你就能够当电子通过的时候看到它们。那么，我们站好了，然后我们注视着当一颗电子被计数的时候我们所看到的，或者在电子被计数之前已经看到了的，是不是在孔1的后面发出一下闪光或者在孔2的后面发出一下闪光，或者也许在每一处同时发出一种一半的闪光。现在我们要靠目测来查明它是怎样过来的。我们点着那盏灯然后注视着，我们发现每一次在探测器上记下一次数的时候，我们看到或者在孔1的后面发出一下闪光或者在孔2的后面发出一下闪光。我们所看到的，百分之一百是电子整个地通过孔1或者通过孔2来到——当我们注视着它从那里过来的时候就是这样。一个佯谬。

让我们在这里把自然界逼到一种困难的境地，我会向你们说明我们要做些什么。我们要让灯一直亮着，然后我们守候着并且数出有多少颗电子穿过来。我们分开两栏来记录，一栏记的是从孔1过来的，一栏记的是从孔2过来的，然后当每一颗电子到达探测器的时候，我们会在相应的那一栏里记下它是从哪一个小孔过来的。当我们把从探测器在不同位置上时孔1那一栏得到的记录通通加在一起，看起来会像什么样子呢？如果我在孔1的后面守候，我会看到什么呢？我看到的是曲线N_1（图30）。那一栏的分布正如我们所想象的把孔2封闭起来时的那样，无论我们是否在注视都是完全一样的。如果我们封闭了孔2，我们得到的分布是与我们守候着孔1所看见的电子到来的分布一样的；类似地，通过孔2到达的电子数目也是一条简单的曲线N_2。现在看，总的到达数目应当是总计的数目。它应当是数目N_1加上数目N_2；因为每一颗过来的电子都已经核对过了，它不是记在栏1上就是记在栏2上。总的到达数目绝对应当是这两者之和。它应当按N_1十N_2分布。但我说过了，它是按曲线N_{12}分布的。不，它是按N_1十N_2分布的。当然，它真的是那样；它应当是那样而它的确是那样的。如果我们把有光照情况下的结果用加了一撇的符号表示，那么我们发现N_1'实际上同没有光照时的N_1是一样的，而N_2'几乎是同N_2是一样的。但当灯点亮并且两个小孔都开启的时候我们看到的数目N_{12}'等于我们看到通过孔2过来的数目加上我们看到通过孔2过来的数目。这是当有光照的情况下我们得到的结果。当我点亮

或者熄灭光源的时候，会得到不同的结果。如果我点亮光源，分布曲线是N_1十N_2。如果我熄灭光源，分布曲线是N_{12}。再点亮光源，它又是N_1十N_2了。因而你看看，自然界陷入困境了！那么，我们可以说，光照影响了结果。在有光照的时候，你会得到与没有光照时不同的结果。你也可以说光照影响了电子的行为。如果你通过这一实验来谈论电子的运动，虽然有点不大精确，你也可以说光照影响了运动，使得那些本来会到达曲线极大值处的电子，因为受到光照的某种影响而偏离了或者错过了，结果落到了极小值处，于是就使得曲线平滑了，产生形状简单得多的曲线N_1十N_2。

电子是非常娇嫩的。当你们看着一个棒球的时候，你是否用光照着它，不会造成什么差别，棒球仍然沿着一样的路径运动。但当你把光照到一颗电子上时，光使电子受到一下打击，令本来要做一件事的电子改做了另外的事，因为你用光照着它，而对电子来说光是那么强烈。假定我们把光源调节得越来越弱，直到它十分黯淡，然后我们使用能够看到十分黯淡的光的一些精细的探测器，用一束黯淡的光来观察。当光越来越黯淡的时候，你不能够期望非常非常弱的光会那样完全地影响电子，使其分布百分之一百地从N_{12}变成N_1十$_2$。当光照一步一步减弱时，它应当越来越像完全没有光照。那么一条曲线怎么样变成另一条呢？但光当然不像水波。光也以一种类似粒子的本性来到，这些粒子叫做光子，当你减弱光的强度的时候，你并没有减弱效应的性质，你只是减少从光源发出的光子的数目。当我减弱光照的时候，我得到越来越少的光子。我能够从电子散射开来的，至少是一颗光子，如果我只有太少的光子，那么当没有光子过来的时N候，电子会直接穿过去，在这种情况下我们就看不到那些电子了。结果是，当用非常弱的光照时，我在记录上必须加上标上“没看见”的第三栏。当光照非常强的时候在这一栏里只有很少的记录，而当光照非常弱的时候大多数电子都落到这里了。因而这里有三栏：孔1、孔2和没看见。你们能够想得出发生了什么事。我确实看到了的电子是按照曲线N_1十N_2分布的，我没有看到的电子是按照曲线N_{12}分布的，当我把光照调节得越来越弱的时候，我看到的电子越来越少，同时有越来越多的电子看不到了。在任何情况下实际的曲线是两者的一种混合，因而当光照减弱时，分布曲线就以一种连续的方式变得越来越像N_{12}了。

你也许会提出许多种能够查明电子从哪一个小孔穿过的不同方法，但我不能够在这里一一讨论了。然而，结果总是表明，不可能以任何方式布置光照，使得你能够说出电子从哪一个小孔穿过而不影响电子到达的分布样式，不破坏干涉图样。不仅是光照，而且任何别的东西——不管你用的是什么东西，在原则上都不可能做到这一点。如果你愿意的话，你能够发明出许多方法来说出电子从哪一个小孔穿过，结果表明它总是从这一个或者那一个小孔穿过。但是如果你试图造出那样的仪器，使得它同时并不扰动电子的运动，那么结果就是你不再能够说出电子从哪一个小孔穿过，并且你会再次得到一种复杂的结果。

海森伯在发现量子力学的定律时指出，他所发现的自然界新定律，

仅当对我们的实验能力给出一些基本的限制时才能保持融洽一致，而这些限制是先前没有认识到的。换句话说，你不能够在实验上想要多精细就做得到多精细。海森伯提出了他的不确定原理，用我们自己的实验条件去表达是这样的。（他用另一种方式来表达，但两者是完全等同的，并且能够从其中任何一种陈述得出另一种陈述。）“不可能设计出无论什么样的装置，来确定电子从哪一个小孔穿过，而不同时对电子施加足够的扰动，从而破坏其干涉图样。”没有人发明出能够绕过这个困难的一种设备。我肯定你们都在跃跃欲试，想要发明检测电子从哪一个小孔穿过的方法；但如果对其中的每一种方法经过仔细的分析，你将会发现它总会有某种毛病。你也许设想你能够不扰动电子就做得到，但结果表明总是有毛病，而你总是能够找出用来确定电子从哪一个小孔穿过的仪器所产生的扰动导致分布样式发生变化的原因。

这是自然界的基本特性，并且告诉了我们关于每一件东西的某种性质。假若明天发现了一种新的粒子，K子——实际上K子即K介子早已发现，但为了给它一个名称让我们这样叫它——并且我用K子去同电子相互作用以确定电子从哪一个小孔穿过。我希望我事先已经知道，这种新粒子的行为不是那种可以用来说出电子从哪一个小孔过来而同时不对电子产生扰动，并且使得分布样式从干涉变成无干涉的类型。因而，不确定原理可以用来作为一条普遍的原则，事先就猜到一些未知对象的特性。它们是受到它们类似本性的限制的。

让我们回到我们的命题A——“电子必定要么就通过这一个小孔，要么就通过那一个小孔”。它对不对？物理学家们有一种方法避免存在着的陷阱。他们采取了如下一些思维规则。如果你有一套装置，能够用来说出电子从哪一个小孔过来（你的确能够有这样一套装置），那么你就能够说出它从这一个小孔还是从另一个小孔过来。电子确实如此；当你在注视着它的时候，它总是从这一个小孔或者从那一个小孔过来。但当你没有用仪器去确定电子从哪一个小孔过来的时候，那么你就不能够说它要么从这一个小孔要么就从那一个小孔过来。（你总是能够那样说它——只要你立刻停止思维并且不由此做出推论来。而物理学家们宁愿不那么说，也不愿在那一刻停止思维。）当你没有在注视的时候下结论说它要么就从这一个小孔要么就从那一个小孔过来，就会产生在预言上的一种错误。如果我们想要说明大自然的现象的话，这就是我们必须走的逻辑上的钢丝。

我正在谈论的这一命题是有普遍意义的。它不仅对两个小孔成立，而且是一条普遍的命题，它可以做如下的陈述。在一个理想实验中的任何事件发生的概率，都是某个东西的平方，在这一情况下我称之为“a”，即概率振幅。而所谓的理想实验，指的是其中每一样东西都尽可能地规定好了的实验。当一件事件可能以几种不同的方式发生的时候，它的概率振幅，这个数“a”，乃是每一种不同的可能方式的“a”之和。如果做了一个能够确定采取哪一种可能的发生方式的实验，事件的概率就被改变了；它变成每一种不同的可能方式的概率之和。那就是，你失去了干涉。

现在的问题是，它真正是怎么样运作的呢？实际上是什么样的机制导致这种事情的产生呢？没有人知道有任何机制。没有人能够对这种现象给出比我刚才给出的更加深入的说明；而我做的仅仅是一种描述。他们能够向你给出一种意义更广泛的说明，指的是他们能够给出更多的例子，表明怎么样不可能说出电子穿过哪一个小孔，而不在同时破坏掉干涉的图样。他们能够给出更加广泛的一类实验，而不止是双缝干涉实验。但那不过是重复着同样的东西进行推理。那样做只是更广了，而一点也没有更加深入。数学能够被做得更加精确；你能够注意到概率振幅是复数而不是实数，并且还有两三个次要之点，那并不会影响主要的概念。而我所描述的就是那深奥的秘诀，而且今天没有谁能够给出更加深入的说明。

我们迄今计算的都是一颗电子到达的概率。问题是有没有任何一种办法去确定单个电子真正到达的位置？当然我们乐于运用概率论，那是在非常复杂的状况下计算成败机遇的一种方法。我们抛出一颗骰子到空中，然后它会受到各种不同阻力的影响，受到各个原子和所有那些复杂作用的支配，我们完全愿意承认我们对其中的细节所知无多，不足以做出一种决断的预言；因而我们限于计算出事情会按照这一方式或者那一方式发生的机会。但我们在这里所讲到的，不是自始至终都是可能性吗，在物理学的基本定律里不都是一些机遇吗？

假定我有一个实验，它设置成在没有光照的时候我能得到干涉的现象。然后我说，即使有光照我也不能够预言一颗电子会通过哪一个小孔过来。我只知道当每一次我注视它的时候它会从这一个或者那一个小孔过来：没有办法事先预言它会从哪一个小孔过来。换句话说，未来是不可预测的。不可能事先凭任何资料以任何方式预言那个东西会走哪一个小孔，或者会在哪一个小孔后面看到它。那意味着物理学已经以某种方式放弃了对状况知道得足够多、就能够预言下面将会发生什么事的原则——如果物理学的本来目的是这样的话，而原来每个人都认为是这样的。这里是那些状况：电子源、强光源、开了两个小孔的钨板，告诉我，在哪一个小孔后面我会看到那颗电子？一种理论认为，你不能够说出你正在观察的电子会穿过哪一个小孔的原因是，它是由某种潜藏在电子源里的非常复杂的东西决定的：它有一些内部的转轮、内部的齿轮、如此等等，它们决定它会穿过哪一个小孔；那是一种一半对一半的可能性，因为像一颗骰子一样，它是随机设定的；现在的物理学是不完备的，如果我得到一套足够完备的物理学，那么我就能够预言它会从哪一个小孔过来了。那就是所谓隐变量理论。那不可能是一种真正的理论；我们不可能做出预言，并不是由于缺乏详细了解的缘故。

我说过如果我不用光照就会得到干涉图样。如果我有一种情况，在其中我得到了干涉图样，那么就不可能通过说出电子从孔1还是孔2穿过的方式来进行分析，因为作为概率分布的干涉曲线是那么简单，它在数学上是同其他两条曲线完全不同的东西。如果我们曾经在有光照的情况下，有可能判定电子从哪一个小孔过来，那么有或者没有光照对它来说都是无所谓的了。无论在我们观察的电子源里有怎么样的齿轮机构，并

且它允许我们说出那东西是穿过孔1还是孔2过来，我们本来都可以在没有光照的情况下观察到，因而我们本来是可以说出在没有光照的情况下，每一颗电子是从哪一个小孔过来的。但如果我做得到这一点，结果得到的曲线应当代表穿过孔1和穿过孔2过来的电子数目之和，但它并不是这样。那么，无论是否有光照，在安排好实验使得它能够产生没有光照的干涉结果的任何状况下，都必定不可能事先有关于电子会从哪里通过的任何资料。这并不是由于我们对那些使得自然界表现出概率性质的内部机构和内部复杂性的无知。那看起来在一定程度上是固有的性质。有人就此这样说过——“甚至自然界自身也不知道电子要走哪一条路”。

一位哲学家有一次说过：“科学真正存在所必需的，是在同样的条件下总是产生同样的结果。”好吧，它们却不是这样。你设置好了环境状况，每一次都有相同的条件，而你并不能预测在哪一个小孔的后面会看到电子。可是科学照样向前发展，尽管相同的条件不一定产生相同的结果。我们不能够精确地预言会发生什么事，那使得我们不愉快。顺带说说，你能够想出一种非常严重和危险的状况，并且人类必定可以做到，而你仍然不能预测。例如我们可以炮制出一套方案——我们最好不那样做，但我们是可以做得到的——在方案中我们设置了一只光电管，现在有一颗电子穿过来了，如果我们在小孔1的后面看到了电子，它就会触发原子弹并且引发第三次世界大战，而如果我们在小孔2的后面看到了电子，我们就进行一些和平试探因而把战争往后延缓。那么，人类的未来就会取决于某种科学所不能预言的东西了。未来是不可预测的。

什么是“科学真正存在”所必需的，自然界的哪些特征是或者不是由一些浮夸不实的预设条件来决定的呢？它们总是由我们运作的物料，由自然界本身来决定的。我们注视着，并且看到了我们所要寻找的东西，而且我们不能够事先成功地说出要发生的事情像个什么样子。结果表明，最合理的可能性并不是那种情况。如果科学要进步，我们需要的是实验的能力，诚实地报告出结果——结果的报告必须不受有些人说他们喜欢结果是什么样子的影响——并且最后——一件重要的事情——解释所得到结果的智慧。关于这种智慧的一个重要之点是，不应当事先肯定必然会发生什么事情。可以有成见，说“那是非常不可能的；我不喜欢那样”。成见是同绝对肯定不同的。我不是指那种绝对的成见——只是一种偏见。只要你仅仅带着偏见，那并不要紧，因为如果你的偏见错了，种种实验结果的不断积累会不断地烦扰你，直到它们不能被置之不理为止。如果你事先绝对地肯定科学要有某些预设条件，才能够对它们置之不理。事实上，科学真正存在所必需的，是在思想上不承认自然界必须满足像我们的哲学家所主张的那些先入为主的要求。

第七章　寻找新定律

严格说来，我在这一讲里想要谈的不是物理定律的本性。也许有人想，人家在谈论物理定律的本性时，就是在谈论大自然了；但我并不想去谈论大自然，而是谈论我们现在对于自然界有怎么样的关系。我要告诉你们，我们想我们知道了些什么，有些什么是猜测的，以及我们怎么样进行猜想。有人希望，如果我讲下去，我就会逐步说明怎么样猜测出一条定律，最后真的为你们建立一条新的定律，那就再好不过了。然而，我不知道我能不能够做得到那一点。

首先我想要告诉你们，现在的状况是怎样的，我们关于物理学知道了些什么。你们也许想，我已经告诉过你们一切事情了，因为在前面几讲里我已经告诉你们所有已知的重大原理。但那些原理必然是关于某些东西的原理；能量守恒原理是同某些东西的能量有关的，量子力学定律是关于某些东西的量子力学定律——并且所有这些原理加在一起仍然不能够告诉我们，我们正在谈论的自然界都包含着哪些种类的对象。那么，我将要告诉你们一点关于这些原理被假定为行得通的所有东西。

首先有物质——并且，令人惊奇的是，宇宙间的所有物质都是相同的。已经知道组成各个恒星的物质是与地球上的物质相同的。由那些恒星发射的光的特征，给出了一种可供鉴别的指纹，我们通过它就可以说出在那里有一些与地球上相同种类的原子。看来生物和非生物都有相同种类的原子；青蛙和石头都由同样一些原料做成，只是它们的排列方式不同而已。因此就使得我们的问题简单一些；我们除了原子之外没有别的东西，到处都是一样的。

各种原子看来又都由同样一些普遍的组分粒子组成。它们当中有一个原子核，以及有一些电子环绕在核的周围。我们能够写出一张我们以为我们知道了的，组成世界的零件的清单（图32）。

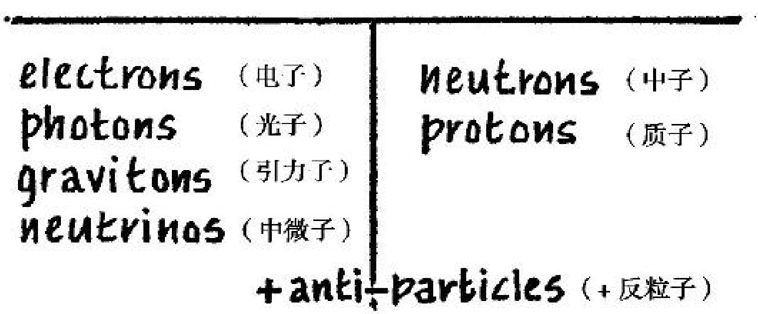


图32

首先是电子，它们是在原子外围的粒子。然后是核，但今天了解到那些核本身又是由两种别的东西，即叫做中子和质子的两种粒子组成的。我们要观察星星，又要观察原子，而它们发射光，光本身又是由叫做光子的粒子来描述的。开始时我们谈到过引力；并且如果量子理论是正确的话，那么就应当有引力的某种波动，它的行为也像粒子，并且把它们叫做引力子。如果你不相信那个东西，你就叫它做引力好了。最后，我已经提到过什么是β衰变，在这种衰变过程中一颗中子蜕变为一颗质子、一颗电子和一颗中微子——或者实际上是一颗反中微子；这里就有了另一种粒子，一颗中微子。在我这里列出的所有这些粒子之外，当然还有所有不同种类的反粒子；那只是一种一张口就把粒子的数目加倍的陈述，并没有什么复杂之处。

有了我列出的这些粒子，就可以解释所有低能量现象，事实上，迄今为止我们所知道的、在宇宙中到处发生的一切普通现象，也有一些例外，那是这里那里存在着的某些能量非常高的粒子的所作所为，以及在实验室里我们已经能够去做的某些特殊的事情。但如果我们不计这些特殊情况，那么所有日常现象都能够用这些粒子的作用和运动去说明。例如，生命本身原则上被设想能够用原子的运动来说明，而那些原子又是由中子、质子和电子组成的。我必须立刻指出，当我们说在原则上说明它的时候，我们的意思仅仅是，如果我们能够弄明白每一件事情，就会发现，为了说明生命现象，在物理学上并不需要发现什么新的东西。另一个例子是，恒星发射出能量的事实，太阳能或者恒星的能量，大概也可以用这些粒子之间的核相互作用去说明。原子行为方式的所有类型的细节，都可以用这种模型来精确地描述，至少到目前为止我们所知道的是这样。事实上，我可以说，在今天我们所知道的各种现象的范围内，没有什么现象是我们肯定不能够按照这种方式来说明的，或者甚至也没有什么现象还存在着什么更加深奥的机制。

从前并不总是有可能做到这一点。例如，有一种现象叫做超导电性即超导，它的意思是金属在低温下不受阻碍地导电。一开始并不明显晓得，这种现象乃是已知诸定律的一种结果。现在已经对它做过透彻的思考，看到了它事实上完全可以用我们现在掌握的知识来说明。还有像“超感知觉”40等别的一些现象，是不能够用物理学知识来说明的。然而那种现象尚未真正被确认，因而我们不能确信其存在。当然，如果它能够被证实，那么就会证明物理学是不完善的，因此物理学家们对于它是否真有其事，感到极为关心。有许多实验表明了它是行不通的。同样的事情还有占星术的影响。如果星象真的会影响到哪一天是看牙医的吉日良辰——在美国我们就有这一类的占星术——那么物理学理论就会被证明为错的，因为没有一种原则上可被理解的、从粒子的行为出发的机制能够说明这种事情。这就是在科学家当中对于那些观念总是抱着怀疑态度的原因。

另一方面，关于催眠术的情形，起先看来也像是不可能的，那时候它的描述尚不完善。现在关于它知道得多一些了，认识到那不是绝对不可能的，通过正规的心理学手段的确可以诱发催眠效应，虽然还不那么

清楚其中的道理；它显然并不需要某种特别的新型的力。

今天，虽然我们关于在原子的核以外的区域发生了些什么的理论看来是很精密和完善了，这指的是只要给我们充分的时间，就能够计算出这方面的任何问题，达到测量所做得到的精确度。但研究的结果表明，我们对组成原子核的中子和质子之间的力还不完全清楚，并且理解得也很差。我的意思是，我们今天不那么理解中子和质子之间的力，如果你给我充分的时间和强大的计算机要我去计算，我还不能精确地算出碳核的能级，或者类似的什么东西。我们知道得不够多。虽然我们能够计算出原子里的外部电子的能级，但我们还不能对原子核也这样做，因为核力还没有得到很好的理解。

为了在这方面做出更多的发现，实验家们要去研究在非常高的能量下的现象。他们在非常高的能量下让中子和质子撞击到一起，以产生一些奇特的东西，然后我们希望通过研究这些奇特的东西能够更好地理解中子和质子之间的力。这些实验已经打开了潘多拉的盒子！虽然我们起先真的想要的是对中子和质子之间的力得到一种更好的认识，但当我们让这些东西强烈地撞击到一起的时候，我们发现了世界上存在着更多的粒子。事实上在尝试理解这些力的过程中，我们挖掘出了五十种以上的粒子[41]；我们将把这五十种其他粒子放到中子/质子那一栏（图33）里，因为它们与中子和质子相互作用以及中子和质子之间的力有关系。

此外，当实验家们在这个泥淖里深掘的时候，还挖出了两种同核力问题无关的粒子。其中之一叫做μ介子或者μ子，还有就是同它相伴的一种中微子。有两种中微子，一种伴随着电子，另一种伴随着μ子。顺便说一下，非常令人惊奇的是，现在我们知道了有关μ子和它的中微子的所有定律，就我们能够用实验检验的而言，定律表明它们的行为与电子及其中微子一模一样，只是除了μ子比电子重207倍之外；但那是在那些粒子之间已知的惟一差别，真是奇怪。其余的五十种粒子真是一个令人生畏的阵势——还要加上它们的反粒子。新的粒子有各种不同的名称，介子，π，K，Λ，Σ。叫做什么都不会引起任何差别，50种粒子得起多么多的名称啊！但我们弄清楚了，这些粒子是组成几个家族的，那多少给了我们一点帮助。实际上在这些所谓粒子中间，有一部分只存活一段很短的时间，由此引起了关于事实上是否有可能确定它们真正存在的争辩，但我不介入到这场争论里去。

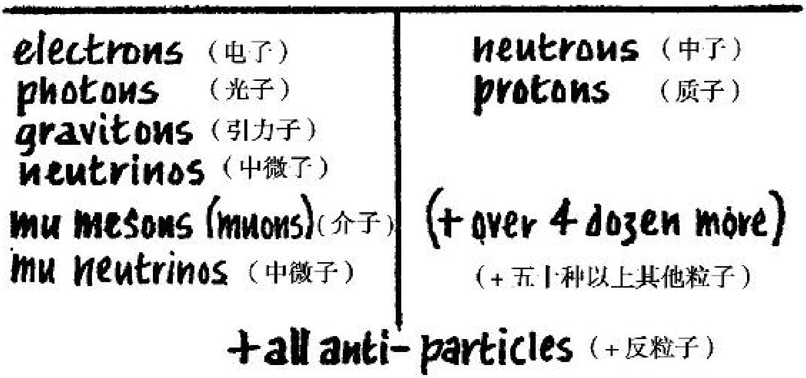


图33

为了讲解粒子家族的概念，我举一个中子和一个质子为例子。中子和质子具有同样的质量，相差只在0.1%以内。质子是1 836，中子是1 839，都是以电子的质量为单位表示。更加令人惊奇的是关于核力的事实，核力即在原子核内部的强作用力，两个质子之间的力与一个质子和一个中子之间的力是一样的，并且也与一个中子和一个中子之间的力相同。换句话说，从强核力的角度看，你说不出一个质子同一个中子有什么差别。因而这里有一条守恒定律；只要你限于谈论强作用力，中子可以用来替代质子而不引起任何改变。但如果你把一个中子换成一个质子，你就会有巨大的差别，因为质子携带一份电荷而中子没有。通过电学测量你能够立即看到一个质子和一个中子之间的差别，因而这种对称性，这种你可以用一个代替另一个的对称性，我们称为一种近似对称性。对核力的强相互作用它是对的，但在自然界的任何更深入的意义上它是不对的，因为它对电磁力是不成立的。这就是所谓部分对称性，而我们需要同这些部分对称性作斗争。

现在粒子家族的概念已经扩充了，弄明白了中子和质子那种类型的替换可以推广到更广泛范围上的粒子。但其精确度则降低了。中子总可以用来替代质子这一陈述仅仅是近似的——它对电磁作用是不成立的——但已经发现的更广泛的这一类替换，可能只有更差的对称性。然而，这一类部分对称性有助于把各种粒子编成一个个家族，从而找出族谱里面空缺的位置，帮助我们发现新的一些粒子。

这一类游戏，或者讲这种家族关系的约略猜测等，演示了在我们还没有真正发现大自然的某种深入的和基本的定律之前的一种预备性的试探方法。在从前科学发展的历史里，这一类例子是非常重要的。例如，门捷列夫[42]关于元素周期表的发现就类似于这场游戏。它是第一步；而用原子理论给出原子周期表的来由的完整描述则要晚得多。同样，对核能级知识组织整理的工作是由梅厄和简森[43]多年前做出的，他们由此提出了所谓核的壳层模型。物理学表现得像是一场类比的游戏，依靠着某些近似性的猜测来降低问题的复杂性。

除了这些粒子之外，我们还有先前谈到过的所有原理，对称性原理，相对性原理以及那些必定表现出量子力学性质的行为的东西；最后，它同相对论结合起来，所有的守恒定律都必须是定域的。

如果我们把所有这些原理摆到一起，我们发现它们的数目太多了。它们彼此之间并不融洽。看来如果我们取量子力学，加上相对论，加上每一样东西都要是定域的命题，再加上几条默认的假设，我们就会陷入互相矛盾的境地，因为当我们计算不同的东西的时候我们得到的是无穷大，而如果得到无穷大我们怎么能够说这是同自然界符合的呢？我上面提到的那些默认的假设的一个例子是如下的一条命题，我们太过于偏于己见，总是要理解其真正的含义。如果你计算每一种概率实现的机会，比方说它有50%发生的概率，它有25%发生的概率，等等，这些概率加起来应当得到1。我们想如果你加齐了所有的可能性，你应当得到100%的概率。那看来是合理的，但合理的东西常常会出问题。另一条这样的命题是，某种东西的能量必定总是正的——它不能够是负的。另有一条命题可能在我们遇到不一致性之前就加进去了，它叫做因果性，它的意思有点像说结果不能够出现在原因之前那样的概念。实际上没有人做出过一个模型是不顾关于概率的命题，或者不顾因果性的，而因果性也是同量子力学、相对论、定域性等相融洽的。因而我们真的不准确地知道，我们的各项假设里的什么东西使我们得出产生无限大的困难。这是一个很好的问题！然而，我们弄明白了，借助于某种生硬的技巧，有可能把那些无限大藏到地毯底下，而暂时我们仍然能够继续做计算。

好了，那就是现今的状况。现在我要讨论的是我们怎么样去寻找一条新的定律。

一般说来，我们是通过以下的步骤来寻找一条新定律的。首先我们对它进行猜想。然后我们计算出从这种猜想出发得到的结果，看看我们猜想的这条定律是准确的话，会有什么样的后果。我们再把计算的结果同自然界比较，把计算结果直接同观察数据比较，看看它对不对。如果它同实验不符合，它就是错的。这样一条简单的陈述，乃是科学的关键。你的猜想有多漂亮，都不会有什么差别。你有多帅，是谁作出这个猜想，或者他叫什么名字，也不会有什么差别——如果它不符合实验，它就是错的。这就是关于它所要说的一切。我们真的要检查一下，以便确定它是错了，因为无论是谁做实验都会有报告得不准确的时候，或者在实验中有某些没有注意到的性质，混入某些尘埃或者别的什么东西；或者计算出结果的那个人，即使他就是提出猜想的那个人，也可能在分析当中发生某种错误。这些都是明显的值得注意之点，因而当我说如果它不符合实验它就错了的时候，我指的是在实验经过检查和计算经过复核之后，并且要对事情来回琢磨几次，以肯定所得到的结果确是那种猜想的逻辑推论，而且事实上它同经过非常仔细的检查的实验结果不相符合。

这会在某种程度上给予你对科学的一种错误的印象。这种看法说我们要做的是不断猜测各种各样的可能性，然后把它们同实验比较，这好

像是把实验放到一个相当不重要的位置上。事实上实验家们具有一种个人的风格。即使还没有人做出猜想，他们依然会做实验，并且他们非常经常地去做那些人人都知道理论家们还没有做出任何猜想的领域里的实验。举例说，我们也许知道许许多多定律，但并不知道它们在高能量的条件下是否成立。而实验家们已经尝试进行高能下的实验，并且事实上实验的结果不时一次又一次地产生麻烦；那是说，它导致一种发现，使得我们原来认为是对的东西变得错了。实验能够以这种方式产生意想不到的结果，而那会启动我们再提出猜想。意想不到的结果的一个例子是μ子和伴随它的中微子，在它们被发现之前，完全没有任何人猜到它们的存在，并且即使到了今天，依然没有人有任何方法，能够自然地猜到这一结果。

当然，你能够看到，用这种方法，我们能够尝试去否证[44]任何现成的理论。如果我们有一种现成的理论，一种真实的猜想，由此我们不难计算出结果并拿来同实验比较，那么我们原则上就可以推翻任何理论了。总是存在着证明任何现成的理论为错的可能性；但要注意，我们永远也不能证明它是对的。假定你想出了一种很好的猜测，计算出了结果，并且发现每一次你计算出的结果都同实验相符。那么这种理论就是正确了的吗？不，它只不过是没有被证明为错误而已。将来你可以计算在更加广泛范围内的结果，也会有更加广泛范围内的实验，而你那时候也许会发现那东西是错的。这是为什么像牛顿定律那样的适用于行星运动的各种定律延续了那么长的时间的原因。他猜到了引力定律，计算出行星系统的所有种类的结果等，将它们同实验比较——这样经过了几百年，直到观察到了水星运动的轻微误差。在那一整段时期里他的理论没有被证明为错，因而可以暂时当做是对的。但它永远也不会被证明为正确的，因为明天的实验也许会成功地证明，你以为是对的东西结果却是错的。我们永远也不能够确定我们是对的，我们只能够肯定我们错了。然而，颇为令人惊奇的是，我们怎么能够有一些观念延续那么长的时间而没有发生错误。

使科学止步不前的方法之一，是只要做那些在你掌握了定律的领域内的实验。但实验家们为之孜孜不倦地努力奋斗的，恰恰是那些看来我们最有可能证明我们的理论是错误的研究。换句话说，我们正在尽可能快地证明我们自己错了，因为只有通过这种方式我们才能进步。例如，今天在普通的低能现象里，我们不知道要到哪里去找毛病，我们想一切都没有矛盾，因而并没有什么特别的庞大计划在核反应或者在超导电里找毛病。在这些演讲里我集中要讲的是基本定律的发现。整个物理学，包括运用基本定律对于像超导电或者核反应等现象加深理解的工作都是很有趣的。但我现在正在讲的是发现毛病，发现基本定律里的错误，并且由于在低能量现象里谁也说不出要到哪里去找，因而今天在这一领域里所有重大的实验都是要发现在高能量下的新定律。

我必须指出的另一点是，你不可能证明一种模棱两可的理论是错的。如果你作出的猜测表达得不清楚而且相当模糊，并且你用来推出结果的方法又有点含糊——你不敢于肯定，于是你说，“我想一切都没有问

题，因为它都是由这样那样得来的，而且如此这般地做这个东西，那么多少我大概可以说明这是怎么样一回事……”那么你看到了这一理论是好的，因为它是无法证明为错的！并且如果计算结果的过程有不确定的地方，那么总可以借助于一种小小的技巧，把任何实验结果修整得好像期待的结果那样。你可能熟悉在另一领域里的这个故事吧。某甲怨恨他的妈妈，那理由当然是在他小时候没有得到她的足够呵护和关爱。但如果你仔细考察，你会发现那时候她确实十分爱他，一切都很正常。原来，这正是因为当他还是一个小孩时，她过分溺爱他了！由一种含混的理论出发，有可能得到截然相反的两种结果。解决这个问题的方法是这样的。假若事先有可能说清楚，爱到什么程度是不足够，又到什么程度是溺爱，那么就会有一种合理的理论供你来做试验了。当指出这一点时人们常常说，“当你在处理心理学事务的时候，你不能够定义得那么清楚”。是的，但另一方面，你也不能声称懂得关于它的任何事情。

当你听到在物理学里我们也有一些完全相同类型的例子时，你也许会感到震惊。我们有这些近似对称性，它们起的作用就像这个样子。你有一种近似对称性，据此你计算出假定它是严格成立时的一组结果。当同实验比较时，这些结果并不符合。当然——你假定的对称性是近似的，因而如果计算结果同实验符合得很好，你会说，“好极了！”而如果符合得很差，你又会说，“噢，这个特定的问题必定对于对称性的失效特别敏感”。现在你们会觉得好笑，但我们只能按这一途径去寻求进展。当一个问题最初是新的，并且这些粒子对我们说来也是新的时候，这种到处试探，这种“凭感觉”来猜想结果的方法，正是科学的开端。在物理学里对称性命题的精确程度，同心理学里的命题是一样的，因而还是不要笑得那么厉害吧。开始的时候必须非常小心。很容易由于这种含混的理论而陷入绝境。很难证明它是错的，要凭着某种技巧和经验，才不至于在这种游戏中误入歧途。

在这种猜想、计算结果和与实验比较的过程中，我们可能在不同的阶段给卡住。当我们脑子空空的时候，我们会在猜想的阶段卡住了。或者我们也会在计算的阶段卡住了。例如，汤川秀树[45]在1934年猜出一个关于核力的想法，但是因为所用到的数学太困难，谁也算不出结果来，因而他们无法把他的想法同实验比较。那些理论长期保留在那里，一直到我们发现了所有那些汤川当时没有想到过的额外的粒子，因此情况无疑远不是汤川提出来的那么简单。另一个你会卡住了的地方是在实验那一头。例如，引力的量子理论进展得很缓慢——如果真的有什么进展的话，因为所有你们能够做的实验，从来不曾同时把量子力学和引力牵扯到一起。同电磁力相比较，引力委实是太微弱了。

由于我是一名理论物理学家，因此更喜好问题的理论这一头，现在我想集中于讲一讲你怎样做出猜想。

正如我在前面讲到过的那样，猜想从何而来是完全不重要的；重要的只是它必须与实验相符，并且它应当尽可能地清楚明确。你会说，“那很简单。你装设好一台机器，一台巨大的计算机，它里面有一个随机转

盘，用来一次又一次地选取一个个猜想，每一次它猜出一个关于自然界应当怎样运作的假设，立刻就计算出结果来，并且同它设在另一头的一张实验数据的单子做比较”。换句话说，猜想是一种一个笨蛋也可以做的事。实际上正好相反，下面我将会解释为什么。

第一个问题是怎么样开始。你说，“好的，我会从所有已知的原理开始”。但所有已知的原理彼此是不融洽的，因而要丢掉某些东西。我们收到许多群众来信，坚决认为我们应该在我们的猜测中留出一些空缺。你们看，你要留出一些空缺，好把地方给新的猜想。有些人说：“你知道，你们这些人总是说空间是连续的。当你进入到一种足够小的尺寸时，你怎么知道那里真的排满了足够多的点，而不是有许多个彼此隔开很短距离的点呢？”或者他们说，“你知道你告诉了我的量子力学振幅，它们是那样复杂和难懂，是什么令你认为它们是对的呢？也许它们是不对的呢？”这样的一些议论，对于在这个问题上工作的任何人说来，答案明显是非常清楚的。仅仅指出来这一点是无济于事的。问题不仅在于什么也许是错误的，而精确地讲，在于能够拿什么来代替它。在连续空间的情况，假定正确的命题是说空间真的由一串点所组成，并且它们之间的间隔是没有意义的，你们那些点就会在一个立方点阵上。我们可以立刻证明这是错误的。它是行不通的。问题不仅仅在于说出什么也许是错的，而是要用什么东西去取代它——而那不是那么容易的。一旦有任何真正明确的想法替代了它，几乎马上就可以看出来它是行不通的。

第二个困难是有无数这种简单类型的可能性。它有点像下面这个故事。你正坐在那里苦干，你已经花了很长时间试图去打开一个保险箱。然后有某位张三走过来，他除了知道你正在尝试打开保险箱之外，关于你到底在做什么一无所知。他说，“为什么你不试一试10：20：30这一组密码呢？”因为你正忙着，你已经尝试过很多东西了，也许你已经试过了10：20：30这一组密码。也许你已经知道了中间那个数字是32而不是20。也许你知道了事实上它是一组五位数字的密码。……那么请不要写任何信件给我，企图告诉我怎么样去做这件事。我阅读这些信件——我总会读它们，以确认我是不是还没有考虑过那些建议——但写回信就太花时间了，因为它们常常都是“试一试10：20：30”这一类的废话。像往常一样，自然界的想像力远远超出我们自己的想象，我们已经从其他各种微妙和深奥的理论中看到了这一点。要得到这样一种微妙和深奥的猜测，不是那么容易的。必须是真正聪明的人，才能作出那样的猜测，那是不可能由机器盲目地做出来的。

我现在想要讨论猜测自然定律的艺术。它是一门艺术。我们怎么做呢？你也许会建议的一种方法是回顾历史，看看别的家伙是怎样做的。因而我们就来看看历史。

我们必须从牛顿开始。他那时候的状况是只有不完全的知识，而他能够把那些都与实验有相当密切关系的概念放到在一起；那时候在观察和试验之间并没有那么遥远的距离。那是第一种方法，但今天它不是那么行得通了。

第二个做了某些伟大事情的家伙是麦克斯韦，是他得出了电学和磁学的诸定律。他做的事情是这样的。他把所有电学的定律放到在一起，那是由在他之前的法拉第和其他人发现的，然后他考察它们，认识到它们在数学上是不融洽的。为了摆平它，他要在一道方程里加上一项。他是通过自己发明一种在空间中有一些惰轮和齿轮等的机械模型来做到这一点的。他发现了新定律是什么样的——但没有人理睬他，因为他们都不相信那些惰轮。我们今天也不相信那些惰轮，但他得到的方程却是正确的。因而，推导的逻辑可以是错误的，但答案却是正确的。

在相对论的情况下，发现的模式是完全不同的。这时候已经积累了一些佯谬或者矛盾；已知的定律给出不一致的结果。这是一种新的思考方法，是从讨论那些定律可能有的对称性入手的方法。它是特别困难的，因为是第一次认识到某些像牛顿定律那样的东西有多长时间看来是对的，而终于成为错误。而且，要接受看来是那么符合直觉的、关于时间和空间的普通概念会是错的，也是一件困难的事。

量子力学是用两条不同的方法发现出来的——这是一个教训。那时候也从实验发现了存在着、甚至存在着更多的大量佯谬或者矛盾，那些东西是绝对不可能由已经知道的定律以任何方式得到说明的。并不是那时候的知识不完善，而是知识太完善了。你的预言是应当发生这样的结果——而实际上并不如此。两种不同的方法之一是薛定谔[46]猜出了方程，另一个是海森伯论证说你必须只分析那些可测量的东西。这两种不同的哲学方法最终导致了相同的发现。

最近我说起过的弱衰变定律的发现添加了一种多少不同的状况。弱衰变就是当一颗中子蜕变到一颗质子、一颗电子和一颗反中微子那一种类型的过程，我们对它的认识还不完全。这一次是有关知识还不完全，而只知道了方程的情况。这一次的特别困难在于实验都做错了。当你计算出结果，而它同实验不符，你又怎么能够猜出那正确的答案呢？你必须有勇气说实验必定做错了。我下面将会说明那种勇气从何而来。

今天我们没有什么佯谬或者矛盾了——也许是这样吧。当我们把所有定律都用上去的时候，我们就会得到这种无限大，但人们把污垢扫到地毯底下去了，他们是那么聪明，使得人们有时候以为这不是一个严重的困难。在这里再一次表明了，我们已经发现了所有这些粒子的这一事实，除了表明我们的知识是不完全的之外，没有告诉我们任何事情。我敢肯定物理学的历史不会再重复它自己，不会重演我上面给出的那些例子。理由是这样的。诸如“考虑对称性定律吧”，或者“把了解到的知识表达成数学形式吧”，或者“猜猜方程吧”等任何的方案，都已经被众人知晓，而他们一直都在试探。当你束手无策的时候，答案不可能是上述方案当中的任何一个，因为你本来就试过这些方案了。到下一次，必定要有另一种方法。每一次我们都陷入太多的麻烦和太多的问题的僵局里去，是因为我们使用的方法都只是沿袭了我们过去用过了的方法。下一个方案，新的发现，将会有一种完全不同的实现方式。因而历史帮不了我们多少忙。

我想要讲一点关于海森伯的关于不应当谈论你所不能够测量的东西的观念，因为许多人谈到这一观念时，并没有真正理解它的意思。你可以解释说，它的意思是，你所做的发明必定是由那种可同实验比较的计算结果一类的东西所构成的，即你计算出的结果不能够像是“一‘牡吐’必有三‘咕噜’”那样的东西，因为谁也不知道一“牡吐”或者一“咕噜”是什么47。那样做明显是不行的。但如果结果能够同实验比较，那么那就正是所需要做的事情。不必在乎在猜想里面有没有出现“牡吐”和“咕噜”那样的东西。你可以在猜想里放进你想要说的那么多废话，只要推出的结果能够同实验比较就行了。这一点总是没有得到充分的认识。人们常常抱怨把粒子和路径等概念没有根据地延伸到原子的领域。完全不是那样的；不能说那些概念的延伸没有根据。我们必须和我们应当，并且我们总是那么做，尽可能延伸我们已经知道了的东西，尽可能延伸我们已经得到了的那些概念。这样做有危险吗？是的。没有把握吗？是的。但这乃是取得进展的惟一途径。虽然那样做没有把握，但必须使科学发挥它的用处。科学仅当能够告诉你要去做哪些还没有人做过的实验时才是有用的；如果它只是告诉你人家刚刚做过了些什么，那它就没有什么用处了。必须延伸那些旧概念，超出它们已经被检验过的范围。例如，引力定律是为了理解行星运动而提出来的，假若牛顿只是说，“我现在了解行星了”，并且不觉得要尝试去比较地球对月球的拉力，那引力定律就不会有多大用处了，后来的人也不会说“也许是引力把星云维系在一起”了。我们必须尝试往外延伸。你可以说，“当你达到星云那么大的尺度时，由于我们关于它什么也不知道，那么任何事情都是可能发生的”。我知道，但没有什么科学接受这种类型的限制。对星云不存在终极的了解。另一方面，如果你假设整个行为都只是受已知定律的支配的，那么这一假设是非常局限和确定的，因而容易被实验推翻。我们要寻找的正是这种假设，这种非常确定而且容易同实验比较的假设。事实上，迄今为止我们了解到的星云的行为方式，看来并不违反各种已知的定律。

我可以给你们讲另一个例子，一个更加有趣和重要的例子。有可能对生物学的进步贡献最大的一个单个假设是，每一种动物做的都是原子所能做的，那么在生物世界里看得到的东西，都是物理现象和化学现象行为的结果，除此之外别无他物。你总可以说，“当你接触生物体时，每一样东西都有可能发生”。如果你接受这种说法，你就永远不会了解生物了。很难相信章鱼触须的蠕动不是别的，而仅仅是许多原子依据一些已知的物理学定律在到处乱闯的结果。但当采用这一假设进行研究时，我们可以做出一些能够很精确地说明它是怎么样工作的猜想。运用这种方法，我们在理解这些事情上取得了巨大的进展。迄今为止章鱼还没有被切下来研究它的运动——还没有发现这个想法是错误的。

做出猜想并不是不科学，虽然科学界以外的许多人的确是那样想的。几年前我同一位非专业人士有一次关于飞碟的谈话——因为我是科学的，我知道关于飞碟的一切！我说“我不以为真有飞碟”。因而我的对手就说，“飞碟是不是不可能存在呢？你能够证明它不可能存在吗？”我说，“不，我不能够证明它是不可能的。它只是非常靠不住的”。他回应说，“你真是太不科学了。如果你不能够证明它是不可能的，你怎么能说

它是靠不住的呢？”但我说的正是科学的方法。科学只是说什么是更靠得住和什么是更靠不住的，而不是总能够证明可能和不可能。为了明确我的意思，我也许应当这样对他说，“听着，我的意思是，根据我看到的在我周围的世界的知识，我认为关于飞碟的报告是地球上有智慧的生命已知的非理性创造的可能性，比地球之外有智慧的生命的理性创造的可能性大很多很多倍”。它仅仅是更靠得住，如此而已。它是一个好的猜测。而且我们总是尝试猜测最靠得住的解释，而同时在心底里记住，如果它行不通，我们就必须讨论其他的可能性。

我们怎么能够猜得到要保留什么和要抛弃什么呢？我们掌握了所有这些美妙的定律和已知的结果，但我们仍然处在某种困境之中；我们要么就得到那些无限大，要么就得不到一种足够的描述——我们缺少了某些部分。有时候那意味着我们要抛弃某种观念；至少在过去总是明白了要抛弃某种已经得到牢固支持的观念。这里的问题是，要抛弃什么和要保留什么。如果你把一切都抛弃了，那么你要再往前走就没有多少东西可以拿来用了。能量守恒看起来毕竟是经得住考验的，并且它是那么美妙，我不想把它丢掉。推断要抛弃什么和要保留什么，需要高度的技巧。实际上它可能仅仅是一种运气，但它看起来就像是运用了高度技巧似的。

概率振幅是非常奇怪的，而你初次想到的是，奇异的新观念明显是荒诞无稽的。然而，尽管它是那么奇怪，但从存在着量子力学概率振幅的观念出发，能够推演出整个一长串的奇异粒子，得出百分之百的正确结果，说明它是能够成立的。因此我不相信，当我们找到世界组成的内部机制的时候，将会发现这些观念是错误的。我以为这一部分是正确的，但我仅仅是猜想：我正在对你们讲的是我怎样猜想。

另一方面，我相信认为空间是连续的理论是错误的，因为我们会得出这些无限大以及其他困难，并且我们还留下了是什么决定了所有粒子的大小这样的问题没有解决。我宁愿怀疑当深入到无限小的空间时，几何学的那些简单的观念会变得不对。当然，我在这里只是留下了一个空缺，而不是告诉你们怎么样去填补它。假使我确实做到了这一点，我就会以一条新的定律来结束我的这个讲座。

某些人曾经运用所有原理互相之间的不一致性，说只有一个可能的自相融洽的世界，那么如果我们把所有的原理放到一起，进行非常精确的计算，我们将不仅能够推导出那些原理，并且将发现如果世界仍然保持融洽的话，这些就是可能存在的仅有的一些原理。在我看来，那像是一番大话。我听起来觉得像是本末倒置了。我相信，要给出存在着的某些东西——不是全部50种奇怪的粒子，而是少数几种像电子等的小东西——那么，运用了所有的原理而得出的宏大的复杂世界，就可能是一种确定的结果。我不认为你能够从关于一致性的论证出发来得出整个世界。

我们有的另一个问题是部分对称性的意义。这些对称性，就像是中

子和质子几乎是相同的但其电学性质是不同的，或者事实上反射对称性是完全成立的只是除了一种反应之外，这一类说法是非常令人烦恼的。事情是差不多对称的，但又不完全对称。现在有两个考虑这个问题的学派。一派说其实很简单，它们实际上是对称的，但另有一点复杂的因素使它走了一点样。另一派观点只有一名代表，那就是我自己，认为事情也许本来就是复杂的，然后只有通过复杂性才能变得简单。古希腊人相信各个行星的轨道是圆形的。实际上这些轨道是椭圆形的。它们不是那么很对称，但也十分接近于圆。问题是，为什么它们非常接近于圆呢？为什么它们几乎是对称的呢？因为存在着一种长期的潮汐摩擦效应——这是一种非常复杂的观念。有可能自然界在她的核心部分里，这些东西是完全对称的，但在实际的复杂世界里它变得看起来好像是近似对称的了，于是椭圆看起来就差不多是圆的了。那是另一种可能性；但谁也不知道，它仅仅是一种猜想。

假定你有两种理论，A和B，在心理学上看来是完全不同的，它们含有一些不同的观念等，但从每一种理论计算出来的所有结果都是一样的，并且两者都同实验相符。那两种理论，虽然初听起来是不同的，但却有相同的一切结果，那么常常不难做出数学证明，通过从A和B出发总会给出相对应的结果的逻辑。假定我们有这样的两种理论，我们怎么样去决定哪一个是正确的呢？科学是给不出这样的方法的，因为两者都在同一程度上与实验符合。因而两种理论，虽然它们也许包含一些具有深刻差别的基本观念，也可以在数学上是等同的，因此没有科学的方法可以区别它们。

然而，为了猜出新的理论，由于心理学的原因，这两种理论可以离等价甚远，因为一种理论给人们的观念是与另一种理论不同的。你把理论放到某种框架里，你就会得出要改变些什么的想法。会有某种东西，例如在理论A里谈到某种东西，而你会说，“我要在这里改变那个观念”。但结果发现在理论B里，与你要在理论A里要改变的东西相对应的东西可能是非常复杂的——它也许完全不是一个简单的观念。换句话说，虽然在改动之前两种理论是等价的，但还是存在着某些途径对一种理论看起来很自然地作出的改变，在另一种理论看来却并不自然。因而在心理学上我们的头脑必须记住所有的理论，而且每一位够格的理论物理学家对完全同样的一个物理学问题都要知道六七种不同的理论表示方式。他知道这些理论都是完全等价的，而且在这一水平上还没有人能够判定哪一个比别的都更好，他只是把它们都记在脑子里，希望它们可以在他进行猜想时提供一些不同的考虑方法。

这使我想起了另一点，那就是当理论中有非常微小的变动的时候，与这理论相联系的哲学或者观念也会发生极大的变化。例如，牛顿关于空间和时间的观念同实验符合得很好，但为了得到水星轨道运动的那么一点点修正，理论的特征需要作出极大的变化。原因是牛顿定律是那么简单那么完美，并且从它们导出了那么多确定的结果。为了得到会产生一种稍微不同的结果的某种东西，理论就要变得完全不同了。在陈述一条新定律的时候你不能够使一件完美的东西变得不完美：你必须拿出另

一种完美的东西来。因而牛顿同爱因斯坦的两种引力理论的哲学观念之间存在着极大的差别。

这些哲学是什么？它们其实就是有助于快速计算结果的一些计谋。一种有时候叫做对定律的一种理解的哲学，简单说来就是一个人为了快速地猜出结果而在他的脑子里记住一些定律的方式。有人说过，而且那是对像麦克斯韦方程那样的情况适用的一段话，“决不要去管什么哲学，决不要去管诸如此类的什么东西，只管猜出方程好了。问题仅仅是计算出答案使得它们同实验相符合，这样做并不需要有一种关于方程的哲学，或者论证，或者什么话语”。那可能是一种好的方法，如果你仅仅猜测方程，那样就会不使自己受到偏见的左右，于是你就会猜得更好。另一方面，可能哲学也会有助于你去猜想。到底如何，谁也难说。

对那些坚持说惟一重要的事情只是理论要符合实验的人说来，我想要假设一位玛雅天文学家同他的学生的一场讨论。玛雅人那时候已经能够以很高的精确度计算出天文学的预测，例如日食月食和月亮在天空中的位置，金星的位置，如此等等。那都完全是由算术算出来的。他们算出某个数目，再减去某些数目，等等。他们没有讨论过月亮是什么东西。他们甚至没有讨论过月亮在轨道上转圈的观念。他们只是算出会发生日食和月食的时间以及什么时候会出现满月，等等。假定有一名年轻人去到天文学家那里说，“我有一个想法。也许这些东西是在轨道上转圈的，在那里的是一些像石块那样的球体，并且我们可以算出它们怎么样以一种完全不同的方式运动，而不仅仅是算出它们什么时候出现在空中”。天文学家说，“是的，而你能够以多大的精确度来预测日食和月食呢？”他说，“我还没有把这个想法推进得很远”。然后天文学家说，“噢，我们能够计算出日食和月食，比你能够用你的模型得到的精确度高得多，因而你一定不要再去考虑你的那个想法了，因为我们的数学方案明显要好得多”。这是一种十分强烈的倾向，当有人提出一种想法并说，“让我们假设世界是这样”的时候，人们有一种强烈的倾向对他说，“你会对如此的一个问题得到什么结果呢？”而他说，“我还没有把它推进得足够远”。于是他们说，“噢，我们已经发展了一种完善得多的方法，并且我们能够得出方程精确的答案”。因此，要不要顾及在想法后面的哲学观念，也的确是一个问题。

当然，还有另一种工作的方式是去猜测新的原理。在爱因斯坦的引力理论里，他猜想在所有其他种种原理之上的是对应于引力总是正比于质量这一观念的原理。他猜想这样一条原理，说的是在一辆加速行进的车子上，你不能区分是不是处在引力场中，然后将这一原理加到其他所有原理之上，他就能够推出正确的引力定律。

上面勾画了几种猜想的方式。我现在想要讲到关于最后结果的其他几点。首先，当我们全部完成了的时候我们也有了一种数学理论，我们能够由此计算出结果来，那么我们还能够做什么呢？那真正是一件令人吃惊的事。为了估算出一个原子在一种给定的状况下的行为，我们制定了一些规则，用符号写在纸上，把它们送进其中装有某种复杂开关电路

的机器，而结果就能够告诉我们原子的行为会是什么样子！如果这些电路开关的方式就是原子的某种模型，如果我们设想在原子里面有那些复杂的开关，那么我就会说我多少懂得了在做什么事了。我发现它十分令人吃惊，它竟然有可能运用数学来预言会发生些什么事，在计算中仅仅遵循了一些规则，而同原始的对象真正在做些什么完全没有关系。在一台计算机里开关电路的接合和分断同自然界里发生的事情实在是相距太远了。

在这种“提出猜想-计算结果-同实验比较”的事情中，最重要的事情之一是要知道你什么时候是正确的。在你核对所有的结果之前，有可能预先知道你什么时候是正确的。你可以通过它的美和简单性来认出真理。当你提出了一种猜想，然后做两三项简单的计算以确认它不是明显错了，就可以知道它是对的，这样做并不难。当你这样做知道它是对的，它就明显是对的了——至少如果你有一点经验的话——因为通常发生的是理论的输出多于输入。事实上，你的猜想是，某些东西是十分简单的。如果你不能够立刻看出来它是错的，而且它比以前的理论更加简单，那么它就是对的了。那些缺乏经验的，想入非非的，以及诸如此类的人们也会提出简单的猜想，但你能立刻看出来他们是错的，因而不必考虑。另外，那些缺乏经验的学生，他们提出的猜想是非常复杂的，并且好像是全都对头的样子，但我知道那是不对的，因为结果表明，真理总是比你想象的更简单。我们需要的是想象，但那是受到严格约束的想象。我们要发现一种新的世界观，它要能够同已知的每样东西相符合，但又在有些地方与预测不相符合，否则就没有意思了。而在那些不相符合的地方，它必须同自然界相符合。如果你能够找出另一种世界观，它同已经观察到的东西的整个范围都是相符合的，但又在别的什么地方出现不相符合，那么你就做了一项伟大的发现。非常接近于不可能，但又不是完全不可能的是，发现任何一种理论，它在所有各种理论都已经检验过的整个范围里都同实验相符合，而且仍然在某一其他范围内给出某种别的结果，即使一种理论的一些不同结果被弄清楚了是同自然界不相符合的也是如此。要想出一种新的观念是非常困难的。那需要一种非凡的想像力。

什么是我们这一场探险活动的未来？最终会发生什么事？我们正在猜测一条又一条新定律；那么到底我们要猜测多少条定律才算完呢？我不知道。我的某些同事说，我们的科学的基本方面会不断发展；但我以为肯定不会不断更新，比方说在一千年之内。事情不会一直保持这样的势头，使得我们总是不断发现更多又更多的新定律。如果我们真的做到了这个样子，发现这么多个层次，一个在一个的底下，那有多烦人啊。在我看来，将来可能发生的事情，或者是知道了所有的定律——那是说，假使你有了足够的定律，你就能够计算出总是与实验相符的结果，那就会是这场探索的终结了——或者实验会越来越难做，越来越花钱，就算你了解了99%的现象，但仍然总是有某种刚刚发现出来的现象，它很难进行测量，并且与理论不相符合；并且你一旦得出了那一现象的解释，又总是会出现另一种类似的新现象，于是进步越来越慢，并且越来越没有意思了。那是探索过程会结束的另一种方式。但我想它总要以这

一种或者另一种方式结束。

我们非常幸运地生活在我们依然不断做出发现的时代。就像美洲的发现那样——你只能发现它一次。我们生活在其中的时代，是我们正在发现自然界的各种基本定律的时代，这样的美好日子是一去不复返的，它真是令人鼓舞啊，它是那么神奇而美妙。但激动终将过去，将来当然会有另外有趣的东西。将来会存在对于不同层次之间的现象的联系的兴趣——诸如同生物学现象的联系等等，或者，如果你谈到探险的话，将来会到别的行星去探险，但那将不是与我们现在所做的相同的事情。

另一件会发生的事情是，如果最后弄明白了一切都已知晓，或者它变得十分单调乏味的时候，那种富于活力的哲学以及对于我先前谈到过的所有这些东西的仔细关注都将逐渐消失。那些总是置身于外围大发无聊议论的哲学家们将能够靠上前来，因为我们不再能够对他们说，“假如你们是对的话，我们就能够猜出其余的所有定律了”，这样来把他们赶走，因为当所有的定律都摆在那里的时候，他们将会对它们给出一种解释。例如，总是有一些关于世界为什么是三维的解释。噢，世界只有一个，因而很难说那种解释是对还是错，结果假如什么东西都知晓了的话，就会有关于为什么那些就是正确的定律的某种解释。但那种解释将会是在一个框框里的解释，我们不再能够通过说那种类型的推理不再允许我们向前进而批评它。那时候将会发生观念上的失落，就好像是发现一块乐土的伟大的探险家，看到旅行者蜂拥而至的时候所感到的失落一样。

在这个时代里，人们体验着一种愉悦的心情，那是当你猜到了在一种以前从未看到过的新情况里，自然界会怎么样运作的无限喜悦。从某一个范围里的实验和信息，你能够猜出在一个以前谁也没有探索过的领域上将会发生什么事。那是同正规的探险有点不同的，在探险活动里对于要发现的地域掌握了足够多的线索，有助于猜测那块从来未曾发现过的地域看起来会是什么样子。顺便说说，这些猜想常常与你们已经看到的科学上的猜想相差甚远，后者是要进行大量思考的。

大自然有什么东西让这种情况发生，使得有可能从世界的一部分猜出其余部分的所作所为呢？那是一个非科学的问题：我不知道怎样来回答这个问题，因此我想要给出一个非科学的答案。我想那是因为大自然具有一种简单性，并且因而具有一种极致的美的缘故。

译后记

费曼这本书最初是1965年由英国广播公司（BBC）出版的，从1967年起转给美国麻州理工学院（MIT）出版社出版。本书近40年来重印了好多次，并被翻译成多种文字出版。在我国台湾省，也先后于1979年和1996年出版了两种中译本，亦经多次重印。本书近年收入兰登书屋《近代世界最佳图书文库》（Modern L ibrary o f the W orld's Best Books），可见其受到普遍重视的程度。

值得指出的是，在国外编撰这一类丛书，必定要选入一部分自然科学的著作，虽然占的分量不一定很大。例如在50年前出版的、总共50多卷的《西方世界名著丛书》（G reat Books o f the W estern W orld, Encyclop aedia Britannica，1952）里，就可以找到上至欧几里得下至达尔文等十余位科学家的著作，包括在国内很难找到的托勒密和开普勒等人的著作。因为，在近代科学的发源地区，从来都是把科学当做文化学术的一个重要组成部分看待的。相形之下，我国的传统则从来不承认科学亦是一种学术，其影响至今未绝。例如，以“学术”为名的刊物，是绝不会登载科学著作的。又如，一种大型的《世界学术名著丛书》，号称包括了哲学、历史、经济、语言、政治、法学等众多方面，开始的时候是一本科学著作也没有的，如今在已经出版的几百本当中，也只补充了少数几本。看来，在文化观念方面，甚至还比不上他们以前的老板王云五的《万有文库》。

我很高兴湖南科学技术出版社为他们的《走近费曼丛书》选中了这部早就应该翻译过来的脍炙人口的著作。费曼的许多事迹已广为人知，译者还提供了一篇稍为详细一点的《费曼小传》作为本书的附录。我以为，费曼最突出的特色是独立思考，书本写的和人家说的，他都不相信，事事要经过亲自推演或者亲身体验。费曼在现代量子理论上的思索和创造，就充分体现了这一点。他通过苦心的钻研，在量子力学的基本原理上形成了独到的见解，从而提出了一套已成为理论物理学家们必备工具的别开生面的理论。不过，费曼在这方面一般只是限于正面阐述自己的观点，从来不公开批评别人或者同对手争论。特别是，费曼不像爱因斯坦和玻尔等老一辈物理学大师那样有发表哲学议论的癖好，他很不喜欢哲学，他关于量子力学到物理学以至整个科学的哲理性观点，一般只零星地散见于各种著作之中。这本书是一个仅有的例外，费曼在这里除了畅谈量子力学和物理学其他分支中的许多重要概念之外，还集中阐发了他在科学认识论和科学方法论等方面的见解，给了我们了解这一位物理学大师思想真谛的一个极好机会。

本书原名“T he Character o f Physical L aw”，可以翻译成“物理定律的特征”。我们现在采取“物理定律的本性”的书名，是因为费曼在书中谈到“在思想上不承认自然界不必满足像我们的哲学家们所主张的那些先

入为主的要求”。他在另一本普及性的小册子（《QED：光和物质的奇异性》，张钟静译，北京：商务印书馆，1994，9页，85页）里也说过：“我希望你们按照自然界的本来面目接受自然界。”“我们不得不用以描述自然界的方式，一般说来，对我们是不可思议的。”他还提出“重要的是这个理论所给出的预言能否与实验符合。而一个理论是否在哲学上令人喜爱，或者是否容易理解，或者是否能从常识的观点看来完全合乎逻辑，所有这些都是无所谓的”。我们采取“本性”的译名，为的是体现费曼强调的“本来面目”的意思。况且，英语里char-acter这个词也确有“本性”这一层意思。

我们从“出版前言”里已经了解到，这本书来源于费曼的一组系列讲座的影音资料和现场笔记稿。虽然后来经过整理，仍然带着明显的口语痕迹。原文的许多句子不大规范，意思也不够完整甚至不够准确。在翻译成汉语的过程中，对一些容易发生误解之处，不得不添加了少数文字。但是，这种做法是受到严格限制的。在行文的分段上，译文亦一如原文，不做任何改动。费曼的每次讲演，均系一气呵成，我们亦不画蛇添足地加上一些小标题。假若在译本里加上太多的解释，变得婆婆妈妈似的，又分成许多小段落，或者堆砌许多华丽的词藻，就失去费曼的朴素而幽默的风格了。每一名读者，都不应该老像婴儿那样，一定要吞咽母亲咀嚼过的易于吸收的食物。应该努力钻研那些不合自己阅读习惯的读物，即使是硬骨头也要费力去啃，这样才会有利于提高自己的阅读和思维水平。希望读者集中于理解作者所阐述的思想和见解，而不必把这本书当做一本物理学或者物理学历史的教科书。

费曼对哲学的态度很值得我们注意。按照他在本书里的意见，科学研究不需要哲学的指导，只是“哲学也许会帮助你提出猜想”。应当说这是当代物理学家普遍持有的一种态度。

老一代的爱因斯坦说过：“哲学的推广必须以科学成果为基础。可是哲学一经建立并广泛地被人们接受之后，它们又常常促使科学思想的进一步发展，指示科学如何从许多可能的道路中选择一条路。等到这种已经接受了的观点被推翻以后，又会有一种意想不到和完全新的发展，它又成为一个新的哲学观点的源泉。”（《物理学的进化》，周肇威译，上海科学技术出版社，1962，34页）这一段话长期被人们传颂，也很符合我们的传统思维习惯。

但是，和爱因斯坦同时代的玻恩（M.Born）后来是这样说的：“我曾努力阅读所有时代的哲学家的著作，发现了许多有启发性的思想，但是没有朝着更深刻的认识和理解前进。然而，科学使我感觉到稳步前进，我确信，理论物理学是真正的哲学。”（《我的一生和我的观点》，李宝恒译，商务印书馆，1979，20页）

而比费曼小一辈的温柏格（S.Weinberg）近年就说得更加明白了。他写道：“哲学家的观点偶尔也帮助过科学家，不过一般是从反面来的——使他们能够拒绝其他哲学家的先入为主的偏见。”“哲学往往不能预

先给我们提供正确的观念。……物理学家……能很好地追踪自然定律的美的踪迹，却不能从高高在上的哲学俯瞰通向那真理的道路。”“这并不是要否定哲学的价值，尽管它们多半与科学没有多少关系。……我们不应当指望靠它（哲学）来指导今天的科学家如何去工作，或告诉他们将要发现什么。”（《终极理论之梦》，李泳译，湖南科学技术出版社，2003年，132～133页）

我们可以从本书中发现，费曼在这方面的基本观点是同温伯格相通的。如果把上面所引的爱因斯坦关于哲学能够“指示科学如何从许多可能的道路中选择一条路”的那句话改成“哲学提供了各种不同的可能道路供科学家选择”，就有可能调解其中的矛盾了。毕竟，在研究中要走什么样的道路，终究是要由科学家自己选择的。

译者很高兴有这个机会，在把费曼这部名著介绍给国内读者的工作中尽一点力量。

关洪

2004年2月于广州

附录费曼小传

关洪

少年时代

1918年5月11日，理查德·菲利普·费曼（Richard Phillips Feynman，1918～1988）出生于美国纽约市郊的一个犹太移民家庭里。他的父亲梅维尔·费曼（M elville Feyn-man），是幼年时随着父母从俄罗斯迁到美国去的，后来从事制服销售生意。他的母亲露西尔·菲利普（Lucille Phillips）基本上留在家里操持家务。理查德是他们的长子。后来，费曼又有了一个比他小9岁的妹妹琼（Joan）。

费曼小时候常常由父亲带到设在曼哈顿的自然历史博物馆参观。父亲还让他玩各种益智游戏，讨论一些认识问题和到大自然里去观察。例如，在费曼很小时，他的父亲就买了一大堆处理品的贴墙用的小瓷片，叫他注意用两种不同颜色的瓷片，按照一定的间隔规则，看看能够排出什么花样来，并且把这种游戏当做基本的数学训练。

父亲教导他，事物本身是不重要的，重要的是怎么样去发现它们；不要光知道事物的名称，要紧的是了解事物的实质。例如，在他只有几岁大，在玩玩具小车时注意到，在小车启动时，车厢上的小球会向后滚，而当小车突然停止时，球就总向前滚。费曼问他的父亲为什么，得到的回答是："谁也不知道！普遍的规律是：任何运动着的物体倾向于继续运动；而静止的物体则倾向于保持静止。人们把它叫做'惯性'，但谁也不知道为什么会这样。"这样就使费曼不仅仅晓得"惯性"这个名词，而且有助于掌握它的实质。

又如，当父亲带着费曼到树林中散步，观察到一些鸟雀时，父亲告诉他："如果你对一种鸟只知道它的名称，哪怕知道了全世界各种语言里对这种鸟的叫法，你还是一点也不知道关于这种鸟的任何事情。所以让我们来看看这只鸟在做些什么，这才是有意义的。"费曼认为，因为受益于他的父亲，他很早就懂得了知道一件事物的名称同知道一件事物是两件不同的事。

父亲还总提出诸如鸟儿为什么经常用嘴喙整理身上的羽毛，和有些树叶上为什么会有一道弯曲的痕迹等问题同他讨论。虽然他父亲对一些问题的解释在细节上未必正确，甚至完全可能是胡编瞎猜的；但费曼认为："他试图向我解释的想法，是生活当中有趣的部分。这种追根寻源的做法无论有多么复杂，主要之点全在于坚持进行下去。"

费曼后来回忆道："这就是父亲教育我的方式。这种教育是通过举例

和讨论进行的，它完全没有压力，而只是一种令人愉快的和饶有趣味的讨论。这种精神在日后的一生中一直激励着我，并使我对所有科学都感兴趣。”

费曼在上初中时，有幸遇到了优秀的数学、物理和化学教师。例如，有一次高中物理老师贝德（A.Bader）看到费曼一副不满足的神态，便对他说：“看来你有点不耐烦，我要给你讲点有趣的东西。”这位教师讲的实际上是质点力学里的最小作用量原理，即质点在初始位置到终末位置之间，等于动能减势能的拉格朗日量对时间的积分，对于实际路径来说取最小值。费曼对此感到强烈的兴趣，对这一原理的偏爱，一直支配着他日后的研究路线。

然而，在高中阶段，真正令费曼着迷的科目是数学。不少科学家都很早就表现出数学方面的天赋，也许因为这是一个单凭个人的智慧和努力，就不难长驱直入的领域的缘故。费曼觉得数学对他说来是很轻松的。他不满足于课内的进度，自学了解析几何和微积分等课目。

费曼在高中的时候还参加了班上的一个代数小组，同其他学校进行比赛。此外，总有一些同学拿着这样那样的数学习题以及难解的谜语来找费曼，而他“不把那些难题解出来，是不会罢手的”。因为来找他的同学越来越多，而中学生遇到的问题又常常是重复的，所以很多时候费曼面对的只是他已经有了答案的题目，当然一下就说出来了。费曼说：“这样虽然我为一个人花了20分钟，却有5个人认为我是一个超级天才。”实际上，费曼的数学直觉和解决问题的非凡洞察力，起初就是通过这样一系列的训练活动而培养出来的。

从小开始，费曼就在家里动手做各种各样的小实验。他自己装过简单的机电和光电控制电路，玩过从前每一个业余爱好者都摆弄过的矿石收音机。上中学后，他又买到一些处理的残旧电子管收音机，包括直流电和交流电的收音机，自己摸索试着修理。他逐渐对这些东西熟悉起来，技术颇有长进，甚至还拥有了专门的工具——自己装配的一个多用伏特表。慢慢地，少年费曼的名气竟在镇上传开来，陆续有人找他修理出了毛病的各式各样的收音机。

20世纪30年代初，正是美国的经济不景气时期。费曼后来说：“人们请我做活的主要原因是经济大萧条。他们没钱修收音机，听说这个小孩会修又要钱不多，所以都乐意来找我。”后来，费曼还修理过打字机等日用的机器。这些少年时代的经验，不仅给日后有机会从事的实际工作带来好处，更重要的是培养了一种不屈不挠地解决问题的精神。他说：“我这人碰到难题，总是不解开绝不罢休。”“发现问题出在哪里，想办法修好它，这正是我感兴趣的，像解难题一样。”

总之，正如费曼自己所讲：“我有解谜的嗜好。这就是为什么后来我要去开保险箱，去辨认玛雅人的古怪文字的原因。”他从小就树立起这样的观念：人生的意义全在于努力解开自然之谜。晚年的费曼为他的两本

被认作是回忆录式的“故事集”（参见文献[1]和[2]）所取的副标题就是“一名好奇角色的历险记”，以此作为他回顾一生的评语。正如他的一位学生希布斯（A.R.Hibbs）在此书的序言中所写：“挑战和挫折，超人的才识和激情，以及从科学探求中获得的极大快乐，这正是他生活中幸福的源泉。”

在家乡，费曼结识了比他小一两岁的一个女孩阿琳·格林鲍姆（Arline Greenbaum）。他是这样形容她的：“她是在附近最受人欢迎的姑娘：她是头号的，最漂亮的姑娘，而每一个人都喜爱她。”一天，阿琳对他说：“我们学到笛卡儿，哲学老师从‘我思，故我在’这一命题出发，而最后证明了上帝的存在。”费曼马上说：“这是不可能的。”他已经从父亲那里学会了不必尊敬权威，对于不管是谁说的话，都要自己去分析和判断。

当费曼运用科学的论证，终于说服了阿琳的时候，她又提起：这只是问题的一个方面，应该再看看问题的另一方面，因为“我的老师告诉我们，‘每一个问题都有两个方面，就像每一张纸都有正反两个面一样。’”而费曼立即回答说：“你讲的这个问题也有正反两个方面。”阿琳吃惊地问：“你这是什么意思？”

原来，费曼已经在《不列颠百科全书》里读到过关于莫比乌斯带的知识。他拿来一条纸条，先铺平了再把它的两端相对扭转180度，最后粘成一个环带。那么，这样做出来的莫比乌斯带就是只有一个面的几何体了。

费曼的演示使阿琳觉得很好玩。第二天上课的时候，她把它带到课堂上去。当哲学老师拿起一张纸，说任何问题都像每一张纸一样有正反两个方面的时候，阿琳取出了她自己的纸环，举手发言说：“先生，甚至你的那个问题也是有正反两个方面的：这就是只有一个面的纸带。”结果，整个教室为之轰动。这次“莫比乌斯带”事件，无疑使费曼的聪明才智给阿琳留下了不可磨灭的印象。

费曼和阿琳在相互切磋当中，也琢磨了彼此的性格。阿琳生活在一个非常讲礼貌的家庭里，他们很注意别人对自己是怎样想的，并且认为讲一些无伤大雅的谎话是不要紧的。阿琳曾经希望，费曼也要在这些方面加强注意。可是，费曼却认为正确的态度应当是：“对于别人想些什么，你在乎些什么呢？”这种观点很快得到阿琳的理解和赞同，并且当做以后两人关系的准绳了。

求学历程

1935年秋天，18岁的费曼中学毕业，进入麻州理工学院（简称MIT）。他起初填写的主修专业是数学。可是，就在第一个学期，听过一段时间的课之后，费曼就去找数学系的主任问道：“学的这些高等数

学，除了为了学习更多的数学做准备之外，还有些什么用处呢？”那位主任回答说：“你既然问了这样的问题，就说明你不是属于数学系的。”

于是，费曼想要转到比较实际的工科专业去。然而，费曼一年级的时候，同宿舍住着两名高年级的同学，他们正在选修由斯莱特（J.C.Slater，1900～1976，他对量子理论做过重要的贡献）教授主讲的研究生课程“理论物理学导论（上）”。有一次，当费曼听到那两位高班同学苦苦讨论的物理问题时，插嘴说为什么不试一试用伯努利方程来求解呢？问题果然得到解决，而这些知识原来是费曼以前自己从百科全书上看来的，从来没有同别人谈论过。类似的多次遭遇，使费曼树立了信心，最后决定主修物理专业。

第二年，费曼正式选修了这门课，这一年轮到斯特拉顿（J.A.Stratton，1901～，他写的电磁学理论，曾经是一本被广泛采用的教材）教授来讲了。选读这门课的几乎都是高年级学生和研究生，斯特拉顿教授很快就看出，费曼是一名真正出类拔萃的学生。斯特拉顿在课堂上推导公式的过程中，不时一下子就给卡住了。每逢出现这种情况，在稍稍迟疑之后，他就转向讲台下，请费曼帮忙解决；而费曼就会带点羞怯地走向黑板，指出改正什么地方便能继续推下去，而他的方法显得“总是正确的，并且常常是机敏的”。

下一个学期，即二年级下学期，他接着选修由莫尔斯（P.M.Morse，他和合作者写的一本《理论物理学方法》，是这方面的经典名著）教授主讲的课程“理论物理学导论（下）”。在这门课程里，已经包括了对量子力学这门新兴物理学理论的初步介绍。1937年秋天，亦即在费曼的三年级上学期，费曼又跟着莫尔斯教授认真地研读狄拉克（P.A.M.Dirac，1902～1984）的名著《量子力学原理》。

总之，在MIT的4年学习期间，费曼在多位名师教导之下，掌握了理论物理学的不同方面，特别是下过苦功钻研量子力学。最后，费曼在斯莱特教授的指导下，完成了他的毕业论文《力和分子》，同时表现出了概念方面和计算方面的突出才能。这一工作发表在权威的科学刊物《物理评论》上，其中包含了后来得到广泛运用的“费曼海尔曼定理”这一道量子力学公式。

在MIT的这一段经历，使他有机会从城郊小镇进入人才济济的科学殿堂，同众多智力超常的同辈交往和角逐，显露出峥嵘的头角；而他也从一个有点腼腆和犹豫的少年，变成一个趋于成熟而充满自信的年轻人了。

毕业之后，起初费曼想留在MIT继续深造。可是斯莱特教授坚持要费曼到别的学校去读研究生，对他说：“你应当看看世界上其他地方是什么样子的。”结果，费曼决定去普林斯顿大学，准备做著名的理论物理学家维格纳（E.P.Wigner，1902～1995）的研究助理。普林斯顿大学是模仿英国一两所著名大学的传统作风而建立起来的。费曼去到那里的当天

下午，就被邀请去研究生院院长家里参加茶会。费曼这个土生土长的美国青年，还从来没有经历过这样的场合，不晓得都有些什么规矩。当听见院长夫人在给他倒茶时问：“你的茶里想要加奶油还是柠檬，费曼先生？”的时候，他竟说：“我两样都想要，谢谢你。”这样的回答马上引起了夫人的笑声：“嘿……嘿……嘿……你真会开玩笑，费曼先生。”弄得他手足无措。茶会结束后他才明白，奶油和柠檬是不能一起放的，他着实犯了一个社交上的错误。

经过了不同文化和风格的熏陶，费曼后来说：“我从不同的学校学到许多不同的东西。”“麻州理工学院的确是好，但斯莱特告诫我要去其他学校读研究生也是对的。我现在也经常劝我的学生这样做。要了解世界的其余部分是什么样的。多样化的训练是很有益的。”而“你真会开玩笑，费曼先生！”这句话，就被费曼选做他的第一本“故事集”的大标题。

费曼入学以后，由于情况的变化，没有师从维格纳，而是做了惠勒（J.A.Wheeler，1911～）的助手。惠勒只比费曼大七岁，头一年刚到普林斯顿担任一名助理教授。他们不仅是师生，也成了一对合作者和好朋友。惠勒对物理学多方面的兴趣和敢想敢为的胆大风格，日后给予费曼以决定性的影响；而惠勒后来也说道：“大学里招学生的理由是他们可以教那些教授，而费曼则是这些学生当中最杰出的一个。”这两人的聚合，真可谓相得益彰了。

惠勒向费曼讲到，所有物理过程的量子力学描写，都可以看成是由一系列相继的散射过程组成。与此同时，费曼继续致力于考虑他早些时候就极为关注的物理学基本问题，即电磁学的量子理论（量子电动力学）。在MIT读本科的时候，费曼读到狄拉克的《量子力学原理》书中最后一句话：“看来这里还需要一些本质上全新的想法。”给他以非常深刻的印象；事实上，费曼早就把解决这一问题当做自己长期努力的目标了。

费曼了解到，电磁场理论的主要问题，是电子自能无限大的困难。这一困难是由于把电子描写成点粒子而造成的。这个问题在经典的电磁学理论里已经存在了。费曼设想，既然问题出在无限大的场能身上，不如根本取消电磁场，就不会有这个障碍了。费曼的这种想法，实际上恢复了电荷之间的超距作用；不过，为了反映电磁作用的有限传播速度（光速），这是一种在时间上“推迟”了的、亦即需要一定时间传递、而不是即时到达的超距作用。

费曼把他的问题带到普林斯顿去，并且明白了它的缺点所在。根据费曼原来的想法，如果没有场，电子在加速运动的时候，将不会感受到抵抗加速的这一份额外的阻尼力，因而违反了能量守恒的要求。

费曼曾经设想，用一个电荷受到空间中其他电荷对它产生的反作用来解释辐射阻尼。惠勒指出那是行不通的，并且让费曼考虑加进超前作用，看能不能得到正确的辐射阻尼。本来，推迟波和超前波，都是满足

电磁场方程的解。但是，由于超前解被认为违反了因果性的要求而从来不被采用。在惠勒的指导下，费曼发现，如果使用一半对一半的推迟解和超前解，并且假定所有的作用源都被一种完全的吸收体环绕着，辐射阻尼就可以看做是由吸收体的电荷以超前波形式对作用源的一种反作用。并且，在这种新的电磁学理论里，既不出现电磁场，也不存在电荷对自身的作用。

1941年春天，费曼将这一工作写成题为《辐射的相互作用理论》的初稿，交给惠勒。1942年春天，惠勒重新进行整理和扩充，把修改后的新稿子《超距作用的经典理论——作为辐射阻尼机制的吸收体反作用》交还给费曼。这时候，太平洋战争已经爆发，惠勒开始忙于参加铀同位素分离的军事工作，无暇再接着研究下去。后来，这一工作的主要部分，以两人联名的形式发表在1945年的《现代物理评论》上。

费曼从这工作中得到两项重大的收获。首先，他学会了，一门已经确立了的物理学理论，也可以用完全不同的方式，甚至是被大家抛弃了的形式来重新表述。他后来说过，一个理论如果可以有愈多不同形式的表述，就说明它愈具有基本的意义。

其次，在这一工作的最后形式里，系统的运动方程可以由一种新式的“全空时观点”的最小作用原理推出来。这指的是，在经典力学的最小作用原理里，作用量S是拉格朗日量L对时间t的积分，而L本身又是粒子在这时刻的坐标和速度（动量）的函数。现在，由于新的作用量里包含有不同时间（即时间上推迟或者超前）的粒子的变量，就不能把空间积分和时间积分分离，而只能写成在整个空间时间中的四维积分。费曼相信，运用同一种方法，必定能够继续攻克电磁场的量子理论。

原来，1932年狄拉克有一篇文章，讨论过量子力学里的拉格朗日量表示。狄拉克指出的是，量子力学里负责把T时刻的态函数ψ（x, T）变换为t时刻的态函数ψ（x, t）的跃迁矩阵（$x_t|x_T$），“相当于”以在这一段时间内的作用量积分（除以普朗克常数）为相位的一个相因子。费曼把狄拉克的“相当于”换成“相等于”；并且，对于时间t的无限小的增量ε，写出不同时间态函数的变换公式，将经典力学里的单粒子拉格朗日量代入这道公式，选择适当的常数A，就能推出量子力学里的基本运动方程——薛定谔方程。

这样，费曼实际上找到了建立量子力学的一种新方法。即有别于海森伯（W.C.Heisenberg，1901～1976）1925年建立的“矩阵力学”和薛定谔（E.Schr?dinger，1887～1961）1926年建立的“波动力学”的，量子力学的第三种等价的数学程式。

这个基础上，费曼创造了一种日后被证明为非常有效的量子理论的崭新的方法，即量子力学的路径积分方法。他相信运用这个方法，必定不难解决他久已萦怀于心的电磁场的量子理论。不过，这时候费曼和他的老师惠勒都已分别参加了战时的军事工作。其间，费曼抽出了六个星

期赶写出博士论文《在量子力学中的最小作用原理》，并在1942年5月通过了学位。然而，处在这样的非常时期，当时这篇论文没有公开发表，自然也没有引起多少注意。

战争时期

这时候，阿琳也在纽约成了一名修习美术的学生。而在晚上，她还要去教人弹钢琴，好挣得自己日间的学费。这种双重劳累的生活，无情地透支着她的健康。已经在普林斯顿深造的费曼，有一次回家时，看到阿琳颈上长了一个小疱，初时以为只是小毛病。后来她开始发热，情况不好，被送进了医院。接着，又发现了她腋下等处的淋巴结肿大，迟迟未能确诊。

在这期间，迫于医务人员和双方家庭的压力，费曼曾经一度违心地向阿琳隐瞒了病情。当她终于从费曼嘴里知道了真相时，第一个反应不是责怪他，而是冲口而出地对他说："天哪！他们让你遭了多大的罪啊！"因为，阿琳深深知道，要使费曼对她说谎是非常困难的，他一定受到过极端的折磨了。经过这件事之后，他们无论如何不会再讲那些"无伤大雅的谎话"，也绝对不再在乎别的任何人是怎么想的了。

最后，经过活组织检验，阿琳被证实患上了"淋巴结结核"。这种病在当时说来是一种不治之症，一般只能再活四五年。这是一场严肃的人生考验，从此刻开始，这两位年轻人将勇敢地并肩对付他们要遇到的一切问题了。

1942年春天，费曼一通过了博士论文，就义无反顾地向他的家庭宣布，他要同阿琳结婚了。几乎所有的家人和朋友全都反对这门亲事。而费曼回答他们说："如果一位丈夫知道他的妻子患上结核病就离她而去，难道这是一种合乎情理的做法吗？"事实上，费曼觉得在感情上，他同阿琳老早就无比紧密地结合在一起了。而更现实的问题是，只有取得了丈夫而不再仅仅是未婚夫的身份，才能够更好地照顾病中的阿琳。

他们联系了在新泽西州离普林斯顿不远的一所慈善医院。然后，费曼借到一辆汽车，自己动手改装成简易的救护车，去迎接羸弱不堪的阿琳，同她的亲人告别后就出发了。就在前往新泽西州的途中，他们两人去了一处市镇政府的办公室，举行了一场没有任何宾客参加的婚礼。此后，每个周末，费曼都从普林斯顿搭车到这所医院来看阿琳。而事实上，在这对新婚夫妇不长的几年婚姻生活里，阿琳基本上都是在医院或者疗养院里度过的。

1942年初，当费曼正在普林斯顿苦攻他的博士论文的时候，他的一位朋友，比他大几岁的实验物理学家威尔逊（Robert R.Wilson，1914～）向他透露了自己刚刚接受了一项秘密的官方任务。这就是研制第一颗原子弹的工作。当威尔孙动员他参加这项工作时，他最先的反应是不

想去。因为，这主要是一件技术性的工作，而他正在为之奋斗并立志献身的则是纯粹的科学问题。其实，在战争时期，差不多所有纯粹物理学的工作都停顿下来为原子弹和雷达等军用研制计划让路了。经过反复的考虑，费曼还是决定参加这一任务。

起初费曼随同威尔孙留在普林斯顿，参加过用电磁方法从天然铀元素中分离^{235}U同位素的讨论。后来的研究表明，这种方法的效率很低，实际的生产是用气体分离法进行的。

经过一段筹备之后，美国政府决定将这个命名为“曼哈顿计划”的核武器研制工程的总部，设在新墨西哥州的一处叫做洛萨拉莫斯的一片不毛之地上。一位理论物理学家奥本海默（J.R.Oppenheimer，1904～1967）是这一项目在技术方面的总负责人，费曼就是他在1943年接纳的第一批科学家当中的一名。当奥本海默了解到费曼的情况后，特地把阿琳安排在距离洛萨拉莫斯最近的一个有较好医疗条件的城市阿尔布克基的一所医院里疗养。

在洛萨拉莫斯负责理论部的是另一位理论物理学家贝特（H.A.Bethe，1906～ ），因为开始没有来多少人，他经常找费曼讨论各种问题。而费曼回忆说：“当我听到物理问题时，我就只考虑物理学，而不管我的话是对谁讲的。于是我就入了迷似的对他讲：‘不，不，你是错的。’或者‘你真笨。’等等。”“我的反对常常是错的。但无论如何，贝特正需要有人给他挑毛病。如果一味谦让，他倒会不满意了。”

才华横溢的费曼，他的高超智慧和洞察力给贝特留下了非常深刻的印象。例如，他们两人合作，在核武器的早期研制阶段就推导出适用于任何质量范围的爆炸效率公式；它一直使用到现在，并且被称为“贝特费曼公式”。由于贝特极为赏识费曼的才干，就委派他领导一个小组，负责计算工作。

贝特是来自康奈尔大学物理系的教授，他在1938年用核聚变反应的机制，成功地解释了太阳能量的来源，从而解决了这一困惑人类的千古之谜，他后来为此获得1967年的诺贝尔物理奖。贝特准确的物理直觉、惊人的分析能力、一往无前的精神、正直的人生态度，都给予费曼以深刻的影响，并且赢得了他的爱戴。

与此同时，奥本海默也看中了费曼。1943年11月，奥本海默写信给他原来所在的伯克利加州大学物理系的主任，竭力建议招揽费曼战后到伯克利工作。他在推荐信上写道：“费曼是明显地超出这里所有其他年轻物理学家的最出色的一个，每一个人都知道这一点。他具有彻底献身的品质和性格，在所有方面都极为明白和健全；他是怀着对物理学一切方面的热爱的一位杰出教师。他对于理论成员（他自己是其中的一员）同实验成员（他同他们非常紧密地和谐合作）都保持着可能做到的最好关系。……维格纳说过：‘他是第二个狄拉克，只是这一时代的人物。’”

但是，由于贝特早些时候的推荐，就在这一个月里，费曼已经接到康奈尔大学物理系请他战后到那里担任助理教授的函件。而且，办事正统而保守的伯克利物理系主任，并不认为有必要这么早就做出聘任的许诺。奥本海默得知这些情况后，于1944年5月再次去信给他的系主任，表示强烈的遗憾和失望。信上写道："费曼不仅是一位极有才华的理论家，而且还是一位最坚定、负责和热情的人物，一名杰出和有头脑的教师，以及一名永不疲倦的工作者。他会以罕见的才干和罕有的热忱来教授物理。……事实上，他正是我们伯克利长期以来所需要的一个人，这个人将贡献于物理系的团结，并且把它的专业水准带领到前所未有的高度。"奥本海默真有眼光，他说的所有这些，都将在费曼日后的长期教学生涯中一一付诸实现，不过并不在伯克利就是了。

当从丹麦逃亡出来的玻尔父子（N.Bohr，1885 ~ 1962；A.Bohr，1922 ~ ）俩辗转抵达洛萨拉莫斯，试图为提高炸弹的威力而出谋献策时，费曼也参加了为此举行的技术会议，坐在一堆大人物的后面，自然也忍不住发了言。会后，费曼出乎意料地接到小玻尔的电话，说他们父子俩要单独同他面谈。在会见后的讨论当中，费曼想到什么就讲什么，直言不讳地回答说："不，那是不行的。那是没用的。""这次听起来要好一点，但那里头有这样的一个该死的笨念头。"等等。反复谈了两个钟头后，老玻尔才说，现在可以叫那些大人物来讨论了。

后来，小玻尔告诉费曼是怎么一回事。原来，在头一次大会之后，他的父亲对他说："要记住坐在那边后面的那个小伙子的名字。他是惟一一个不怕我，并且会在我说出一个愚蠢的想法时敢于指出来的家伙。所以，下回当我们有想法要讨论时，我们根本不要去找那些对任何问题都只会说'是，是，玻尔博士'的家伙。我们要先找到这个家伙同他谈谈。"

除了参加各种技术问题的讨论之外，费曼的主要工作是主持一个小组，进行工程计算。他们使用的计算工具，是一些现在早已看不到了的、手摇操作的机械式计算机；费曼在读大学的时候，已经熟悉了这种机器，现在很快就成为这方面包括使用和维修的一名专家。

开始时，每台计算机独自进行各种运算，这样效率并不高。他们了解到国际商用机器公司（IBM）已经生产用穿孔卡片输入的，各种由电动机驱动的加法机、乘法机等，就去定做所需要的机器。与此同时，在这种做法的启发下，他们采取"流水作业"的办法，让每一台计算机各司其职，分别专门做加法、乘法或者开方等，并且用手写的卡片来传递数据。结果，计算效率增加了好几倍。事实上，这相当于一种手工操作的原始程序方法。

留在阿尔布克基医院里的可怜的阿琳，日渐衰弱下去。除了在周末能够见到费曼之外，阿琳平时就不断写信，寄托对她郎君的思念。为了消磨时光，这些信上常常有一些谜语或者其他小玩意儿，两人从中获取了无穷的快乐。为了出其不意，他们甚至还分别练习过中国的书法，以表达相互的情谊。

1945年6月，阿琳终于不行了。一天，费曼知道情况危急，匆匆赶到医院。阿琳已经呼吸困难，昏迷不醒。几个小时后，费曼目送她永远离去，这一天是6月16日。

费曼随即回到洛萨拉莫斯，他不知道怎样面对众多的同事，只是对他们简单地说："她去世了。而任务进行得怎样了？"他们都明白他不想沉浸在悲痛之中，便如常地继续工作。只是在1个月之后，当费曼走过一家百货商店，看到橱窗里的一套漂亮衣服，忽然想到阿琳一定会很喜欢的时候，才禁不住恸哭一场。

完成了一项重要的计算之后，费曼请假回到纽约家里稍事休息。一天他收到一份电报："婴儿将于某日出世。"他知道时候到了，马上乘飞机回基地，赶上了开往进行代号为"三一试验"的试验场地的车队。那一天是1945年7月16日，一个可纪念亦可诅咒的日子。他被安排在离爆炸中心20英里（约合32千米）处的观察站。清晨5时30分，费曼躲在一辆卡车的挡风玻璃后面，用肉眼目睹了远方升起了一团比千百个太阳还亮的巨大火球。他原先以为，在这么远的距离，核爆炸的主要伤害只在于紫外线，一块厚玻璃就可以挡住。后来他才晓得害怕，无论如何，他可能是用肉眼直接观察第一颗原子弹爆炸的惟一的一个人。

那些日子，在洛萨拉莫斯，人人都为试验成功而欢欣鼓舞，热闹得好像过节一样。费曼看到，只有威尔孙独自闷闷不乐，他对费曼说："我们造的这个东西太可怕了。"接着，8月上旬美国军队在日本广岛和长崎制造的悲剧，使更多人变得清醒起来。正如奥本海默后来所说："无论是指责、讽刺还是赞扬，都不能使物理学家们摆脱那本能的内疚；因为他们知道，他们的这种知识，本来是不应当拿出来使用的。"

在洛萨拉莫斯的那几年，费曼经历了一场刻骨铭心的爱情，也看到了起初以莫大热情投入而诞生的一团巨火。现在，在他的生活里交织在一起的爱和火都结束了。曾经沧海的费曼，心灰意冷地离开洛萨拉莫斯，从此以后，他再也不参加任何为军事服务的工作了。

现代量子理论的建立

1945年11月，费曼离开洛萨拉莫斯，前去康奈尔大学物理系上任。

在到康奈尔前不久，费曼永别了爱妻；翌年秋天，他又失去了慈父。此外，费曼还笼罩在自己参与研制的核武器的威力被美国当局滥用的阴影之下，情绪相当低沉；他觉得以前对物理学研究的灵感好像已经"耗尽"，再也做不出什么来了。一天，他在校园咖啡厅吃午饭的时候，看到一个孩子把印有康奈尔校徽的一个碟子旋转着扔到空中。费曼观察到，碟子一边旋转，一边摇晃；并且从校徽图案的转动看出，碟子自转的频率差不多是摇晃频率的两倍。这一现象顿时引起了他的兴趣，他马上动手用经典刚体力学的方程去解出这种运动。费曼从这个例子联

想到电子的运动和它的自旋，重新燃起了对量子电动力学的热情。

1947年春天，他先对在普林斯顿时写的博士论文进行整理和修改，使它变成一种普遍性的理论。这篇1948年发表在《近代物理评论》刊物上、题为《非相对论性量子力学的空间时间方法》的总结性论文，第一次公开阐述了他所创立的量子力学的“路径积分方法”，即把从初始状态到终末状态的、所有在空间时间中的可能路径所贡献的振幅，都叠加或者积分起来，以构成总振幅的方法。在这篇日后将成为量子力学经典文献的论文里，已经摆脱了对于原来含有超前解的超距作用模型的依赖，而仅仅把它当做一个应用的例子。

1947年初，兰姆（W.E.Lamb，1913～）和里瑟福（R.C.Retherford，1912～1981）运用在战时雷达研究中得到飞速发展的微波技术，观察到氢原子能级里的“兰姆移位”。这是当时最先进的相对论性量子力学理论也解释不了的一种崭新现象。

1947年6月初，美国物理学会等组织筹办了以“量子力学和电子”为题的“设尔特岛会议”。与会者有费密，奥本海默，贝特，冯·诺伊曼（J.Von　Neumann，1903～1957），拉比（I.Rabi，1898～1988），泡令（L.C.Pauling，1901～），外斯科夫（V.Weisskopf，1908～）和惠勒等著名的科学家；费曼和来自哈佛大学并与他同庚的施温格（J.S.Schwinger，1918～）等人也作为年青物理学家的代表被邀请出席。这是费曼首次与这许多“大人物”同时参加的一次“纯粹”物理学会议。他回忆道：“在我后来在世界各地参加的会议中，我都没有感觉到像这一次会议那么重要。”

在会议的头一天，兰姆报告了他们关于氢原子光谱线移位的最新实验结果；拉比也介绍了他们实验组观察到的类似偏差。而对于这些问题，在会议之前和会议当中，都没有得出一种恰当的理论解释。

贝特在会后离去的列车上，对兰姆移位做了一种非相对论性的估算。通过适当选择积分上限的截断，结果同当时的实验数据符合得很好。这是对兰姆移位的一个理论上的初步解释。贝特的工作，引起了费曼的浓厚兴趣。因为，此前费曼关于路径积分及其相对论化的研究，主要是当做一种基本方法来考虑的。现在，正好提供了一个初试牛刀的极佳机会。经过了一段时间的努力，费曼终于用他自己的路径积分方法解决了这个难题。

费曼还由此发展了一种图形技术，能够大大地简化微扰计算的分析。在这种后来被普遍运用的“费曼图”里，用顺时间方向的线段代表电子的运动；与此同时，受到在普林斯顿时惠勒告诉他可以把正电子看做逆行电子的启发，又用逆时间方向的线段代表正电子、即电子的反粒子的运动。由于这是一种相对论性的理论，在图形中的每个关节点的空时坐标，在计算中都是要对整个空间时间积分的。因此，在对由一个图形代表的那项的全部积分中，就包括了所有各个关节点的时间先后顺序各

不相同的那些贡献。而其中的每一种不同的时间顺序，在老式的微扰计算里，一般都代表一个单独的项；这些不同的项，对应着过程里含有或者不含有电子正电子对等的不同的“中间态”。现在，按照费曼的方法，一下子就算出了原来要先分开来算的好些项的贡献之和；而这个和式，一般要比原来的每个单项都简单得多。并且，对于与愈复杂的图形相对应的计算，这种优越性就愈明显。

起初，费曼在一定的程度上是凭着直觉和猜测建立起他的理论的。这种新的方法还有待补充和完善。不过，费曼也已经敏锐地看出，他的方法不仅适用于量子电动力学、即电子同光子相互作用的理论，也应当适用于刚刚兴起的介子理论的微扰计算。

与此同时，施温格也在尽全力做同样的问题，用量子电动力学去计算兰姆移位和电子反常磁矩，并且得到与费曼相类似的结果。1948年四、五月之交，在美国宾夕法尼亚州举行的“波科诺会议”上，他们两人又一次相遇了。这是接着设尔特会议召开的第二次相近主题的讨论，出席的是上次会议的大部分成员，还添上玻尔父子、维格纳、狄拉克等著名的学者。

会议开始，上午先由施温格开始做一个延续了七八小时的报告。他是使用人们比较熟悉的方法进行计算的，其中满是繁复的数学公式。下午的后半段时间，才轮到费曼发言。费曼的新颖思想，一时很难被人接受；特别是他的路径积分方法，大家全都初次听到。面对着听众连珠炮似的提问，费曼越解释就引出越多的麻烦。而当费曼讲到他的图形时，老玻尔站起来，以权威的口吻打断说：20年前，我们已经知道，在量子力学里是不能使用电子的路径或者轨道的概念的。言下之意是费曼根本没有学好量子力学。其实，经典力学的轨道是粒子通过的一条确定的轨迹；而费曼说的路径只是粒子运动的一种可能途径，计算时需要把所有可能路径的贡献求和。费曼也知道，玻尔实际上并没有弄清楚自己讲的是什么意思，况且有些问题还没有考虑到。因此，他决定下一步要把这些东西都整理出来，写成文章发表。

另一方面，在会议上费曼和施温格进行了密切友好的交流以及互相参照和帮助。虽然他们俩人对于对方的数学方法和具体计算还来不及弄明白，但是双方的基本思路和主要结论，都是很接近的。他们坚信，尽管暂时几乎得不到任何其他人的认可，而俩人能够达到相互理解和认同，就证明了他们所做的工作一定是正确的。

就在这时，在日本出版的英文刊物《理论物理学进展》上面载有朝永振一郎（S.Tomonaga，1906～1979）1943年发表的一篇日文文章的英译文，讲的正是量子场论的相对论性形式，以及有关无限大量的消去办法。这表明了几年前朝永在与世隔绝的情况下，已经建立了施温格理论的基本纲要。

1947年秋天，正当众人对量子理论进行着这一轮热火朝天的新冲击

之际，戴孙（F.J.Dyson，1923～）从英国来到康奈尔做贝特的研究生，并且不久就同费曼成了挚友。戴孙回忆说：“费曼是一位极有独创性的科学家。他不把任何人的话当真。这就意味着他得自己重新发现或发明几乎全部物理学。……他说他不理解教科书中所讲的量子力学的正规解释，所以他必须从头开始。这实在是个壮举。在那些年月里，他比我知道的任何其他人都更加用功。最后他有了自己能够理解的对量子力学的解释，然后他又继续用这种解释来计算电子的行为。……我用正统理论为贝特所做的‘量子电动力学’计算，花了我几个月的时间，用掉几百张稿纸；而费曼在黑板上演算，只用半小时就得到了同样的答案。”

于是，戴孙决定，在完成了贝特所布置的任务之后，“我的主要工作应当是了解费曼，并且用世界上其他人都能懂得的语言来解释他的思想。”1948年夏天，同这两位物理学家有过深入接触的戴孙忽然领悟到，费曼的图形和施温格的方程，恰恰是同样一套理论体系的两个不同的侧面。回到康奈尔，戴孙很快写出了《朝永，施温格和费曼的辐射理论》和《量子电动力学中的S矩阵》两篇文章，系统地论证了他们三人理论的等效性，并且把费曼方法的路径积分表述翻译成大家都能看懂的形式。经过戴孙创造性地整理改写的这一理论方法，给出了后来普遍使用的量子场论的标准程式。

1949年4月中旬，费曼又参加了接着波科诺会议召开的第三次讨论理论物理学基本问题的“老石头会议”。主持会议的奥本海默回顾了两年来的三次会议之间，在量子电动力学理论上取得的决定性的惊人进步。而在这次会议上，完全是由费曼唱主角了。

根据费曼的方法，只要确定了具有一定拓扑结构的费曼图，像拼砌积木一样，对图形上每一段代表初态或末态粒子的外线和代表中间态的内线，以及每一个多条线段交会的顶角和封闭回路等，按照一定的规则写出相对应的一些因子和运算符号，就立刻可以得到完整的易于计算的振幅公式。费曼还发展了在计算总振幅时需要用到的一套“算符排序”等运算技巧。从此，这种构成了现代量子场论的一系列概念和语言，就成为每一位理论物理学家所必须掌握的基本工具；而其中常常用到的费曼图，费曼积分，费曼振幅和费曼规则等名词则处处留下了他的印记。费曼所参与创造的、最早对量子场论中出现的无限大量的消减处理方法，后来又发展成为一种“重整化”理论。

1965年，费曼以及朝永和施温格三人，由于在“量子电动力学方面的基础性工作”，共同获得了该年度的诺贝尔物理奖。当年12月，费曼在他的获奖讲演里，回顾了从大学时代开始的这一场历时多年的奋斗经过。他说，在最后的理论里，既没有当初的超距作用，也没有超前势了。这就好像麦克斯韦（J.C.M　axw　ell，1831～1879）从他早期的机械模型脱胎出独立的电磁场理论一样。费曼打个比方说，譬如一位老妇人，今天已经风采不再。但是，我们还是能够称赞任何一位老太太说，她曾是一位很好的母亲，孕育过一些很好的孩子。

对科学和教育的贡献

1950年2月，费曼应邀到加利福尼亚理工学院（简称Caltech）去讲学，很欣赏那里的自然气候和学术气氛。其实，人家请他去讲学，正含着想把他挖过去的用意。经过初步接触，Caltech很快应允给刚刚三十出头的费曼以正教授的待遇。可是，康奈尔已经安排费曼在1951到1952学年为带薪的学术假，又碍于贝特的深厚情谊，弄得他有点进退两难。Caltech得知这一情况后马上决定，费曼调来后的第一年享受学术休假，不必到校，照领薪水。这一打破常规的优惠做法，终于收到了效果。

于是，第二年，费曼在去Caltech报到，并且写完上一阶段工作的最后一篇总结性文稿《在量子电动力学中运用的一种算符运算》之后，1951年8月到1952年6月，按照事先的安排，到巴西去讲学一年。从南美洲回美国后，费曼一直在Caltech物理系工作，并于1959年起担任托尔曼理论物理学教授，直到他去世为止。

费曼在Caltech工作的30多年里，继续在理论物理学的不同方向的研究上获得了累累硕果。与此同时，他一直坚持在物理教学的第一线上，也取得了非凡的成就。可以这样说，费曼把他的一生，都献给了物理学的研究和教育事业。以下逐一扼要地介绍他的一些主要成就：

一、超流问题

早在20世纪初，实验就发现了，液态氦$^{2}_{4}\mathrm{He}$在温度2.19K以下，会发生完全无阻滞的流动。这种在很低温度下的现象称为超流动或超流。对于超流现象，曾经有过一些不同的理论解释。费曼从1953到1957年，系统地研究了超流问题。首先，他认为以往的每种理论都反映了实际问题的一个侧面，也都不够完整：因此，他动手以路径积分方法，用量子统计物理学的基本工具，从头计算这个问题。费曼的工作，最后可以得出在低温下系统会发生从常流体到超流体的“相变”的定性结论。不过，因为当时的条件所限，其预言在定量上还不能令人满意。后来，在20世纪80年代有人按照费曼的理论方案，用大型计算机做出其中的路径积分，便得到了与实验符合的结果。

二、弱相互作用理论

李政道和杨振宁1956年发表关于基本粒子弱相互作用中宇称不守恒的理论，并且很快由吴健雄等在$^{60}\mathrm{Co}$的β衰变的实验研究得到证实之后，在全世界引起了一场轰动。

费曼认真地阅读李和杨的文章。当他看到文章上用来描写μ子衰变的相互作用公式时，领悟到有可能由此引伸出一种适用于包括β衰变在内的任何弱衰变过程的普遍理论。原来，1934年费密提出的β衰变理论，是计及衰变初态及末态四个粒子（费密子）在内的一种直接相互作用。根据包括宇称守恒在内的相对论不变性的要求，这类相互作用可能

有五种不同的独立形式：标量（S），矢量（V），张量（T），轴矢量（A）和赝标量（P）。现在，一些实验结果连同新发现的宇称不守恒现象，暗示着真正的相互作用，可能是V和A的叠加，也可能是S和T的叠加。不过，由于当时不同的实验小组所得的结果互相矛盾，一时未能做出最后的结论。

1957年夏天，费曼从他的同事玻姆（F.Boehm）那里了解到最新的实验进展，他们自己系里的实验小组已经开始得到倾向于V和A的结果。费曼马上用从李和杨的工作中受启发得到的，代表着最明显的宇称不守恒效应的，等量的V和A的叠加，即V　A的作用形式进行计算。结果发现，同样的相互作用形式和同样的弱耦合常数可以很好地同时解释μ子衰变和中子（或原子核）的β衰变。

这时候，费曼的一位同事兼好友盖尔曼（M.Gell-M ann，1929～）刚从外地旅游回来。费曼得悉盖尔曼也正在做V　A理论的工作，于是两人合写了一篇文章，发表在1958年的《物理评论》上。在他们阐述了弱作用的这种“普适V　A理论”的这篇文章里，还提出了“矢量流守恒”（CVC）的假设。这指的是，中子β衰变的矢量耦合常数与μ子衰变的矢量耦合常数相等，反映了中子的弱耦合强度不会因为其参与的强耦合而发生改变。

盖尔曼和费曼的这一工作，标志着对弱相互作用的理解，从过去对各个不同过程的分散研究，达到了一个普遍性认识的新阶段。费曼对他的这一成果很有点沾沾自喜，并且觉得：“这是我第一次发现一条新的定律。”他觉得自己关于量子理论方面的基本贡献，主要是提供了一种新的计算方法；而关于超流等研究工作，又仅仅是对于已经发现的现象的解释。只有这一次，才真正满足了他从小要找出物理学的规律，揭示自然之谜的梦想。

三、量子引力理论

引力理论是宏观物理学中的古老内容。20世纪初爱因斯坦提出的广义相对论，本质上是一种宏观的引力理论。量子力学建立以后，怎么将引力论和量子论结合起来，便成了物理学家们继续努力的下一个目标。费曼从20世纪60年代初期开始，致力于探讨这个问题。那个时候，关于理论上预言的、类似于电磁辐射那样的引力辐射或引力波是否一种真正存在的物理对象，还没有取得统一的认识。

费曼坚信引力波的存在，并且用他所建立的路径积分方法，处理了引力场的量子理论。他的工作一方面用关于引力子的量子场论的方法重新给出广义相对论里的基本方程；另一方面则进一步对于近似（微扰）计算中所涉及的某些关键图形（圈图）的发散性质进行讨论，对量子引力问题做了一系列基础性的工作。

虽然引力场的量子化问题，迄今没有得到令人满意的解决；但是，

费曼的处理方法的确是有开创意义的。例如，1962年，费曼首次用路径积分方法处理了引力理论中的规范不变性。后来，大家发现这种处理比传统方法更为有效，于是它就成了在20世纪70年代开始兴盛起来的规范场论的标准形式。

今天，费曼所提出的路径积分方法，已经被广泛地运用于包括粒子物理、核物理、原子物理、高分子物理、材料物理、经典波动分析和宇宙论等各个物理学分支。

四、部分子模型

1968年上半年，费曼开始考虑像质子那样的强相互作用粒子（即强子）之间的碰撞。在能量很高的情况下，碰撞时间极为短促，质子还来不及作为整体参与作用。费曼认为，实际上在一次碰撞里发生作用的，只是质子里的一些点状的组成部分。在他看来，在高能碰撞时，质子等强子可以看成是由若干个在质子内部独立运动的点状粒子组成，这些粒子被他称为“部分子”。按照他的想法，高能强子之间的碰撞总概率，应当近似等于碰撞双方所含所有部分子两两发生碰撞的概率。

这时候，在斯坦福大学的直线加速器中心（SLAC）对电子质子的非弹性碰撞做了深入的实验研究。1967年，SLAC的布约肯（J.D.Bjorken）对实验结果进行分析，提出所谓“标度近似”，细致地反映了点状组分在电子质子的非弹性碰撞中的支配地位。

1968年8月，费曼来到SLAC访问，了解到那里的进展。费曼和布约肯发现，两人理论的主要想法竟然是不谋而合的，而费曼的分析方法则更为清楚和有效。于是，在SLAC兴起了一阵部分子模型的热潮，很快取得了一批有价值的成果。按照费曼的模型，每个部分子携带着整个质子的一个确定部分的能量和动量。因此，在对非弹性碰撞实验资料的分析中，就有可能得到关于质子以及一般的强子内部分布细节的了解。

部分子原是费曼用来分析碰撞动力学时引入的实体。而在早几年，盖尔曼通过对类似于元素周期表那样的强子谱的分析，提出过组成强子的更深层次的单元——夸克。物理学家们很快就证认出，费曼的部分子，主要的就是夸克。所以，也可以说，电子质子的非弹性碰撞数据表明了夸克在质子内部是近似做自由运动的。

五、在物理教学上的贡献

在物理学研究上取得累累硕果的同时，费曼许多年来一直坚持在教学第一线上。费曼热爱教学工作。他曾说过：“我不相信，我真的可以脱离教学而做得成什么。这是因为，我需要有事可做，使得当我头脑空空而且无处可去时，我可以对自己说：‘至少我在活着，至少我在做事；我在做着贡献。’”

费曼还认为，教课对自己的研究很有好处。他说：“如果你在教一门

课，你可以思考那些已经熟知的基本的东西。……有没有更好的方式去表达它们？有没有与此相关的新问题？你可以从此得出什么新思想吗？……”“学生们的问题常常是新的研究工作的源泉。他们时常问我一些深入的问题，是我曾经考虑过多次而暂时搁下来了的……他们的提问唤醒了我去思考有关的一些问题。靠你自己是不容易想到这些东西的。”“因此，我发现进行教学和同学生接触会使生活充实，并且我决不接受一个我不再从事教学的职位，即使有谁给我弄到了这样一个很舒适的位置。决不！”

从1961年秋季开始，费曼为低年级学生主讲了一次两年的物理学导论课。同他合作的是散兹（M atthew Sands）和莱屯（Robert B.Leighton）两位教授。这是由散兹发起的、改革基础物理课程的一次尝试。在这两年内，费曼几乎用全力投入这项工作，他在课堂上的讲授全部录了像，后来据此整理出版成三卷本的《费曼物理学讲义》（以下简称《讲义》，编者注）。

费曼希望学生集中注意那些本质的东西。与有些教师着重于提高考试成绩，以及另一些教师着重于同后续课程的衔接或者将来的实际应用都不同，费曼宣称：“我讲授的主要目的，不是为你们参加考试做准备——甚至不是为你们服务于工业或军事做准备，我最想做的是向你们给出对这个奇妙世界的一些欣赏，以及物理学家们看待这个世界的方式，我相信，这是现今时代里真正文化的主要部分。（或许有其他学科的许多教授会反对这一点，但我相信他们是完全错误的。）”

费曼的讲授不追求数学上的严格，也不落实于具体的应用，而是通过引人入胜的叙述，运用丰富而生动的例证以及深刻而精辟的议论，透彻地讲解各种物理现象的本质和规律。这套具有鲜明特点的《讲义》出版后，很快风靡全世界。它以强烈的感染力熏陶着一代又一代的年轻物理学家，伴随着他们闯进物理学的各个未知领域。与此同时，这套《讲义》亦成为广大物理教师案头必备的参考读物。人们普遍认为，这套《讲义》是费曼对物理学的一大贡献，他实际上起到了物理教学上的“众师之师”的作用。费曼后来也领悟到，他为此停下了两年的研究工作的确是很值得的。

除此之外，根据费曼在康奈尔大学和洛杉矶加州大学的讲演，先后出版了《物理定律的本性》（1964）和《QED：光和物质的奇异理论》（1985）两本普及性的讲义。

不息探索的一生

费曼曾经指出，学习物理学有五个方面的理由。他的意思简单说来：第一是为了学会怎样动手做测量和计算，及其在各方面的应用；第二是培养科学家，他们不仅致力于工业的发展，而且贡献于人类知识的进步；第三是认识自然界的美妙，感受世界的稳定性和实在性；第四是

学习怎样由未知到已知的、科学的求知方法；第五是通过尝试和纠错，学会一种有普遍意义的自由探索的创造精神。由此可见，在费曼看来，科学首先是一种认识世界的思想方法，学习科学不只是学到科学知识，更重要的是学会科学创造的精神和探索未知领域的方法。

费曼认为："科学家是探险者，而哲学家是观光客。"又说："我是一名探险家，我喜欢发现。"费曼的一生，正是勇于怀疑，不息探索的一生。戴孙这样说过费曼："首先，他不相信别人讲的所有东西。这是他的本性。他总是怀疑专家们告诉他的任何东西。他要从一个全新的观点，自己来理解物理学的基本规律。"那么，这种从未知到已知的探索是怎样进行的呢？

按照费曼的体会，发现新的科学规律，是从猜想开始的。他说："猜想从何而来是完全不要紧的；重要的是它要同实验相符合。"费曼还强调，理论是不可能由经验直接推出来的："现实经验的细节常常同基本定律相距甚远。"这里明显地表现出理性主义的光芒。那么，怎样提出猜想呢？费曼认为，历史的借鉴和哲学的启迪会有助于猜想。但是，戴孙告诉我们，"费曼发现新事物，看来就好像玩魔术一样——他不是通过通常数学的普通过程做到这一点的，因为他可以通过某种稀奇古怪的过程猜出答案，他自己对其中的进程也不理解，而我们当然就更不清楚了。"

费曼的探索精神，并不限于在科学方面。他到世界上来一趟，不满足于只做一名观光客，而是要做一名探险者。在物理学界，早就流传着关于费曼的各方面的一些轶事。晚年的费曼，同莱屯教授的儿子小莱屯（Ralph Leighton）成了好朋友。1985年，小莱屯把费曼平时所讲的故事整理汇编成集。这本"Surely You're Joking M r.Feynman！"A dventures o f a Curious Character出版后引起了世界性的轰动，连续十几周名列《纽约时报》最佳畅销书目。1989年，又出了第二集"W hat Do You Care W hat Other Peop le T hink？"Further A dventures o f a Curious Character，这本书的书名，则取自费曼同阿琳之间的约定，此书也获得成功。

这两本书出版以后，好评如潮。例如《华盛顿邮报》评论道："仅从这本书就可以看出，费曼是一位极具独创精神的、才华横溢的、无限好奇的、富于活力的、调和折中的、热情奔放的、爱好交游的、精于嘲弄传统观念的人物，还可以看出他对科学的献身，对第一性原理的体验，以及他才具有的关于实在的观点。"书中的各个故事，给我们勾画出费曼生活中的方方面面，被认为是他的自传式作品。

从这两本书和其他资料中我们了解到，费曼不仅研究物理学，而且也涉猎到其他科学的领域。例如，他早期对噬菌体遗传现象的研究，导致在哈佛大学生物系的一次正式科学报告；他对玛雅象形文字的破译，发现了古人的天文学知识；他后来关于用量子力学讨论计算机能力的文章，也成了量子计算理论方面的经典。至于在洛萨拉莫斯工作期间，由于缺乏娱乐而设法破解密码去打开保险箱等小把戏，就更不在话下了。

也是在洛萨拉莫斯的时候，工余时间闲得发慌，费曼学会了击拍当地印第安人的鼓供自己消遣。后来，他竟成了一名邦戈鼓（bongo，一种非洲鼓）的业余演奏能手，而小莱屯是他的一个伙伴；他们不仅在学校里或者朋友们的聚会上助兴，而且还为正式的芭蕾舞演出登台伴奏过。此外，在巴西讲学期间，费曼也曾厕身当地的桑巴（Samba，一种拉丁舞）乐队，操作一种打击乐器，参加狂欢节的巡游。

费曼在艺术上的另一方向的尝试是绘画。在Caltech的时候，他结识了一位画家左思安（J.Zorthian）。这位朋友自告奋勇地教授和参加函授教育的结果，使从小就自认为缺少美术天分的费曼居然也像模像样地作起画来，并且还正式卖出过几张油画和素描。最后，在朋友们的怂恿下，在Caltech的教授俱乐部里，费曼举行了一次个人画展。费曼认为，他从这些活动里获得了很有价值的新鲜体验。

费曼的探索精神，充分体现在他的“嗅觉试验”里。在洛萨拉莫斯的时候，费曼对人们常说的警犬的嗅觉比人灵敏得多表示怀疑。他和阿琳做了一些简单的试验，结果：“我发现，警犬的嗅觉的确很灵敏，然而人类也并非像他们自己认为的那样差。”费曼把人类嗅觉效果比较差的原因归于人直立行走后鼻子离地面远了。他曾经试着在地下爬行，看看能不能提高嗅觉的效果。后来，在朋友们的一个晚会上，他表演了他的嗅觉技巧，可以闻出不同人摸过的书本的气味。可是，由于费曼经常开玩笑甚至有点恶作剧，大家都不相信他真的是闻出来的。

费曼的所作所为，诚然不像一位模范人物。1954年春天，费曼被选为美国国家科学院院士。费曼觉得，如果参加这个团体的主要任务仅仅是投票决定有谁够资格享有这一荣誉，那就没有什么必要去凑数。但是，为了不辜负长辈和朋友们的期望，他仍然参加了一些活动。不过，最后费曼还是向科学院的院长提出了辞呈。他的这些表现，自然会被人认为是我行我素、玩世不恭，甚至是狂妄自大、行为乖张。

1945年阿琳逝世之后，费曼过了几年单身汉的生活。1952年在巴西的时候，在异国他乡只身独处的费曼，不免倍感寂寞。他想起了在康奈尔时结识的一位女友玛丽·露意丝·贝尔（M ary Louise Bell），于是远隔万里向她写了一封求婚信。得到接受之后，在1952年6月，刚从巴西回国的费曼便同玛丽结成夫妻。但是，玛丽是一位讲究虚荣并且过分好强的女性。她坚持要求费曼屈从于她，表现得像一个严肃庄重的教授，放弃不拘小节、自由自在的生活。两人终究过不到一起，他们只共同生活了四年，于1956年离异。

1958年夏天，费曼在去瑞士参加第二届国际和平应用原子能会议期间，在美丽的日内瓦湖畔遇到了一位年轻的英国女子关妮丝（Gw eneth How arth，1934～1989）。后来，通过相互的交往和了解，发现彼此适合于成为终身的伴侣。第二年，两人便结成夫妇，终于建立了一个稳固而和睦的家庭。他们生育了一个儿子卡尔（Carl Feynman，1962～）；又收养了一个女婴，取名米歇尔（Michelle Feynman，1968

~）。费曼从不强求他的子女去攻读物理学或者其他理科专业。事实上，卡尔大学本科超初主修哲学，后来改读计算机科学，米歇尔则成为了一名专业的摄影师。

1978年夏天，费曼因腹部疼痛就医。检查结果是患了一种癌症——脂肪肉瘤。这是一种会迅速蔓延的恶性肿瘤。在UCLA癌症诊所所做的外科手术中，从费曼腹部取出了差不多有足球那么大小的一块病变组织，并且发现癌细胞已经侵入了脾脏和一个肾脏。

三年之后，到了1981年10月，复查又发现费曼腹部的癌肿重新长大，并且和肠子缠绕在一起。在接着进行的第二次手术中，发生了主动脉破裂的意外。这是一种异常凶险的情况，病人很容易由于大量失血而下不了手术台。当急救的消息传到Caltech的校园里后，数以百计的学生立即赶到医院，为他们敬爱的教授献了大约40升的血。手术做了14小时才结束，总算挽救了他的性命。

第二次手术之后，费曼过了几年病情相对稳定的日子。1986年1月28日，美国“挑战者号”航天飞机发射后不久发生爆炸，七名宇航员全部不幸遇难。费曼应邀到华盛顿去，参加为调查这一事故而专门成立的、由前国务卿罗杰斯（W.Rogers）牵头的总统委员会。

费曼很快发现，他的工作习惯同美国官方的办事作风格格不入。他拿出了当年在洛萨拉莫斯的劲头，独自到有关的机关和部门去了解和调查。1986年2月11日，在委员会全体出席的一个公开的听证会上，费曼当着电视摄像机的镜头，用一杯普通的饮用冰水做了一个演示实验，证明运载火箭连接部O形密封圈的材料，在发射当时的低温下会失去弹性。正是由于这一原因，导致火箭燃料泄漏而起火爆炸。通过电视实况转播，一日之间，费曼成了一位在美国家喻户晓的科学明星。

这次的活动恐怕是费曼最后一次出远门了。1986年10月和1987年10月，为了对付继续生长的肿瘤，费曼相继接受了第三次和第四次手术，以至于他的腹腔的一侧几乎都被掏空了。费曼的腰向一边倾斜，他感到虚弱、疲倦和疼痛，并且时常表现得无精打采。但是，费曼仍然为研究生们讲授“量子色动力学”的课程。只有同科学和探险有关的话题能够激发起他的精神与活力。

1988年2月3日，费曼情况不好，又一次住进医院。他的身体已经不能再动手术，他自己也不想用肾脏透析之类的手段来无谓地拖延生命。2月15日晚上，费曼结束了他不息探索和不停历险的一生，离70岁还有不到3个月。第二天，悲痛的学生们在Caltech密立根图书馆的顶层挂出了一块布幛，上面用醒目的大字写着“WE LOVE YOU, DICK”（Dick是费曼的名字Richard的昵称），表示他们的深切悼念。

参考文献

1 R. P.Feynman.“Surely You′re Joking, M r.Feynman！”A dventures o f a Curious Character.Norton，1985（中译本：爱开玩笑的科学家.吴丹迪等译.北京：科学出版社，1989）

2 R. P.Feynman.“W hat Do You Care W hat Other People Think？”Further A dventures o f a Curious Character.Norton，1988（中译本：你干吗在乎别人怎么想？李沉简，徐杨译.北京：中国社会科学出版社，1999）

3 R. Leighton.Tuva or Bust！Richard Feynman′s Last Journey.Norton，1991

4 关洪.纪念理查德·费曼.物理，18（1989）427

5 J. Schwinger ed.Selected Papers on Quantum Electrodynamics.Dover，1958

6 S. S.Schweber.Feynman and the visualization of space-time proces-ses, Rev.Mod.Phys.58（1986）449

7 Phys. Today.42（1989）no.2，Special Issue：Richard Feynman

8 J. Gleick.Genius——The Li f e and Science o f Richard Feynman.Pantheon，1992

9 J. Mehra.The Beat o f a Di f f erent Drum：The Li f e and Science o f Richard Feynman.Oxford U.P.1994

10 S. S.Schweber.QED and the Men W ho Made It：Dyson, Feynman, Schwinger and Tomonaga.Princeton U.P.1994

11 C. Sykes ed.No Ordinary Genius——The Illustrated Richard Feynman.Norton，1994

12 关洪.观光还是探险？从《费曼物理学讲义》的诞生谈起.大学物理，17（1998）6期，43

13 关洪.勇于向传统观念冲击的理查德·费曼.三思评论.第一卷.南昌：江西教育出版社，1999.100～105页

[1]古希腊的阿利斯塔克（Aristarchus）曾经提出过太阳系的日心说。——译注

[2]第谷·布拉埃（Tycho Brahe，1546～1601）。丹麦天文学家。——原注

[3]1弧分等于1弧度的1/60，1弧度约等于57.3°。——译注

[4]费曼在这里讲地面上的物体在1秒的时间内落下的距离，指的是从静止开始的第1秒（头1秒，不是“每一秒”）。这段距离数值上等于g/2（g是重力加速度），即等于4.9米，合16英尺。——译注

[5]罗默（Claus Roemer，1644～1710），丹麦天文学家。——原注

[6]亚当斯（John Couch Adams，1819～1892），英国理论天文学家。勒维尔（U rbain Leverrier，1811～1877），法国天文学家。——原注

[7]卡文迪什（Henry Cavendish，1731～1810），英国物理学家和化学家。——原注

[8]厄缶（Baron Roland E?tv?s，1848～1919），匈牙利物理学家。——原注

[9]狄克（Robert Henry Dicke）美国物理学家。——原注（狄克于1916年出生——译注）

[10]“程式”（formulation），指理论程式，或者理论的“数学程式”（math-ematical formulation）。有人用的“形式体系”的译法，不够确切和简练。——译注

[11]狄拉克（Paul Dirac），英国物理学家，与薛定谔分享1933年的诺贝尔（物理学）奖。——原注（狄拉克的生卒年份为1902～1984——译注）

[12]金斯（James Hopwood Jeans，1877～1946），英国数学家，物理学家和天文学家。——译注

[13]斯诺（Charles Percy Snow，1905～1980），英国物理学家，文学家和社会活动家。1959年发表演讲“两种文化和科学革命，”引起巨大反响。他的文集《两种文化》已在国内出版了两种中译本。——译注

[14]此处原文是“There is no royal road……”直译是“没有……王室道路”；而这已经成为一句英语成语，意思是没有坦途或者捷径。——译注

[15]这里讲的棋赛指国际象棋，它的棋盘由两种颜色的小方格交错相间而成，棋子摆在方格当中，而不是像中国象棋那样摆在纵横线的交叉点上。——译注

[16]法拉第（Michael Faraday，1791～1867），英国物理学家。——原注

[17]原文如此。按原文前面写出的一道反应式，表示的是两颗质子由于相互碰撞而产生的一种反应，不适宜称为一种衰变。——译注

[18]原文误作“图3”。——译注

[19]在现代物理学里，热力学温度的单位开尔文（K）乘以玻耳兹曼常数k，频率的单位乘以普朗克常数h，以及长度单位（费米是一种长度单位）的倒数乘以适当的常数，都可以用来做能量的单位。——译注

[20]玻尔（Niels Bohr），丹麦物理学家。——原注。（玻尔的生卒年份为1885～1962——译注）

[21]外尔（Hermann Weyl，1885～1955），德国数学家。——原注

[22]此处原文为translation in space。英语translation的本意是转移和迁移。在数学名词和物理学名词里定为“平移”，即不带转动的平行移动。但这里还没有谈到平行移动的概念，所以先说转移或者迁移也可以。至于“时间平移”的说法就有点不合适了，因为时间只有一维，何来平动和转动的分别？我们在下文里还使用了“时间迁移”的说法，因为在汉语里，“迁”既可以用于空间，亦可以用于时间。——译注

[23]麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831～1879），英国剑桥大学的第一位实验物理学教师。——原注

[24]庞加莱（Jules Henry Poincaré，1854～1912），法国科学家。——原注

[25]伽利略这本著作原名“关于两门新科学的谈话”，英译本改成《关于两门新科学的对话》。费曼原文说的是一种想象的狗骨的多幅图像，但伽利略的书中只有一幅假想的巨兽骨头的图像（图27），并且没有指明是狗骨。译文根据伽利略的原文做了改动。——译注

[26]傅科（Jean Bernard Léon Foucault，1819～1868），法国物理学家。——原注

[27]巴斯德（Louis Pasteur，1822～1895），法国细菌学家。——原注

[28]开塞钻（cork-screw），用来拔出酒瓶木塞的螺旋形器具。——译注

[29]莫里森（Philip Morrison），美国物理学教授，参看1964年英国广播公司第一套节目（BBC 1），电视系列讲座“原子的构造”。——原注

[30]李政道和杨振宁。中国物理学家，共享1957年诺贝尔奖。——原注

[31]1995年第一次在实验室中观察到反氢原子。——译注

[32]尤克斯利（uxley）和乌克斯利（wuxley）是费曼生造的两个单词，音译如上。——译注

[33]后来的实验证实了在弱作用过程中，例如在中性K介子的衰变过程中，确有微小的时间逆转不守恒的效应。——译注

[34]1亿亿亿＝10【sup】24【/sup】，相当于阿伏伽德罗常数的量级。——译注

[35]参看《费曼物理学讲义》第一卷第46章。——译注

[36]霍依尔（Fred Hoyle），英国天文学家，剑桥大学。萨尔皮特（Edwin Salpeter），美国物理学家，康奈尔大学。——原注

[37]原文大多数场合说的是“小孔”（hole），亦有个别地方说的是“狭缝”（slit），意义其实是相通的，译文依照原文不改。——译注

[38]I是英语名词intensity（强度）的第一个字母。——译注

[39]干涉的原意指压制和削弱，而物理学里的用法不同，可以是削弱也可以是加强。——译注

[40]原文为extra-sensory perception，大致相当于我国常说的“特异功能”。——译注

[41]原文为“四打”，是一个约数。为阅读方便，改成“五十”。而且下文的确亦有“五十种……粒子”的说法。——译注

[42]门捷列夫（Dimitri Ivanovitch Mendeleev，1834～1907），俄国化学家。——原注

[43]梅厄（Maria　Mayer，1906～1972），美国科学家，获得1963年度诺贝尔奖，1960起任加利福尼亚大学物理学教授。简森（Hans　Daniel　Jensen，1907～1973），德国科学家，获得1963年度诺贝尔奖，1949起任海德堡大学理论物理研究所所长。——原注（两人的生卒年份为译者所添加）

[44]原文为disprove，意思是“证明……不成立”，这里译成“否证”，即“否定的证明”的简称，与在文献中见到得比较多的、通常译为“证否”的fal-sification意义相近。——译注

[45]汤川秀树（Hideki　Yukawa，1907～1981），日本物理学家。京都大学基础物理学研究所所长。获得1949年度诺贝尔奖。——原注（生卒年份为译者所添加）

[46]薛定谔（Erwin　Schrdinger，1887～1961），奥地利理论物理学家。同狄拉克共获1933年度诺贝尔物理学奖。——原注（生卒年份为译者所添加）

[47]“牡吐”和“咕噜”的原文是moo和goo，都是费曼生造出来的单词，音译如上。——译注